

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2013

David Polok

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Téma:

**Napájecí transformátory pro plazmatrony s řízeným
usměrňovačem**

**Power Transformers for Supply of the Plasmatrons with
Controlled Rectifier**

Zadání bakalářské práce

Student: **David Polok**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika

Téma: **Napájecí transformátory pro plazmatrony s řízeným usměrňovačem**
Power Transformers for Supply of the Plasmatrns with Controlled Rectifier

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor: Třífázové výkonové transformátory, základní principy, závislosti, vlastnosti charakteristiky.
- 2) Specifika a dimenzování transformátorů pro řízené polovodičové usměrňovače.
- 3) Typová volba a dimenzování transformátoru pro řízený usměrňovač.
- 4) Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


Hapl, J., Nosek, K.: Stavba Transformátorů, ČVUT, Praha, 1971
Měřička, J., Hamata, V., Voženílek, P., Elektrické stroje, ČVUT, Praha, 1993
Havelka, O.: Elektrické přístroje, SNTL, Praha, 1985
Bečka, J.: Příručka usměrňovací techniky, SNTL, Praha, 1971
Ibl, J., Kubát, M.: Základy průmyslové usměrňovací techniky, SNTL, Praha, 1964
Haškovec, J.Š., Zika, J.: Tyristory, polovodičová technika č.12, SNTL, Praha, 1972
Vztažné normy, firemní katalogy a prospekty

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. 5. 2013

Podpis.....

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, kterým byl Ing. Petr Bernat, Ph.D., za odbornou pomoc při vypracovávání této bakalářské práce.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá teoretickým návrhem třífázového transformátoru pro plazmatron s řízeným usměřňovačem. První část práce se zabývá teorií transformátorů, principy, vlastnostmi a jejich děleními. V následujících kapitolách jsou řešena specifika a dimenzování transformátorů pro danou problematiku. Poté je celá kapitola o teoretickém výpočtu třífázových transformátorů o výkonech 250, 400 a 800 kVA dle normy ČSN 35 100. Pro typovou volbu komerčně nabízených transformátorů, jsou vybrána od firem Elpro-energo s.r.o. a firmy KOČÍ-VALÁŠEK s.r.o.

Abstract:

This thesis deals with the theoretical design of three-phase transformer for “Plasmatrons” with controlled rectifier. The first part deals with the theory of transformers, principles, characteristics and their divisions. The following sections are addressed to transformers specifications and sizing for each of the issue. Then, the entire chapter is about theoretical calculations of three-phase transformers with 250, 400 and 800 kVA according to ČSN 35 100. There are selected commercially offered types of transformers among following Companies: Elpro-Energo Ltd. and KOČÍ - VALÁŠEK Ltd.

Klíčová slova:

Třífázový transformátor, Plazmatron, Řízený usměřňovač, Tyristor, Olejový transformátor

Key word:

Three-phase transformer, Plasmatron, Controlled rectifier, Thyristor, Transformer oil

Seznam použitých symbolů a značek:

B	Magnetická indukce
B _j	Magnetická indukce v jádře
B _s	Magnetická indukce ve spojce
C	Kapacita
D, d	Průměr vinutí
D _j	Průměr kružnice opsané
D _s	Střední průměr vinutí
f	Kmitočet
G	Váha
h _o	Výška okna
h _s	Výška spojky
I	Proud
I ₀	Proud naprázdno
I _{0a}	Proud naprázdno v 1. Fázi
I _{0b}	Proud naprázdno v 2. Fázi
I _{0c}	Proud naprázdno v 3. Fázi
I _m	Magnetizační proud
I _z	Činná složka proudu naprázdno
i _i	Okamžitá hodnota proudu
J	Proudová hustota
k ₀	Koeficient využití
k _p	Koeficient využití jádra
k _ž	Koeficient plnění železa
L	Indukčnost
L _j	Délka jádra
L _s	Délka spojky
l _c	Šířka cívky

lv	Výška vinutí
M	Vzdálenost os sousedních jader
m	Počet fází
N	Počet závitů
N1	Počet závitů na primární straně
N2	Počet závitů na sekundární straně
NN	Nízké napětí
O	Obvod vinutí
Os	Střední obvod vinutí
P	Výkon
p	Převod
Q	Magnetizační spotřeba
S	Zdánlivý výkon
R	Odpor
Rm	Magnetický odpor
Rs	Střední poloměr
Sj	Průřez jádra
Ss	Průřez spojky
s	Průřez vodiče
T	Teplota
U	Napětí
Uz	Zkušební napětí
Ui	Efektivní hodnota indukovaného napětí
U1	Primární napětí
U2	Sekundární napětí
U0	Napětí naprázdno
ui	Indukované napětí
uk	Napětí nakrátko v %

u_z	Napětí na jeden závit
V	Objem
X	Reaktance
Z_1	Impedance
Z_k	Impedance nakrátko
z_{10}	Měrné ztráty
η	Účinnost
Δ	Šířka mezery mezi vinutím NN a VN
Δ_1	Tloušťka vinutí VN
Δ_2	Tloušťka vinutí NN
δ	Šířka vzduchové mezery
ρ	Měrný odpor
σ	Proudová hustota

Obsah

1. Úvod	1
2. Teoretický rozbor: třífázové výkonové transformátory, základní principy, závislosti, vlastnosti charakteristiky.	2
2.1. Definice použití transformátoru.....	2
2.2. Dělení transformátorů.....	2
2.3. Základní principy, závislosti, vlastnosti charakteristiky.....	4
3. Specifika a dimenzování transformátorů pro řízené polovodičové usměrňovače.	12
3.1. Plazmové technologie.....	12
3.2. Obecný postup při návrhu transformátoru.....	20
3.3. Kontrola výpočtu pro obecný návrh transformátoru.....	25
4. Typová volba a dimenzování transformátoru pro řízený usměrňovač.....	28
4.1. Konkrétní postup při výpočtu olejového transformátoru 250kva.	28
4.2. Napětí nakrátko a ohmické odpory.....	36
4.3. Nabídka komerčních transformátorů.	42
5. Zhodnocení, závěr.	51
5.1. Zhodnocení.....	51
5.2. Závěr.....	52

1. Úvod

Má bakalářská práce bude pojednávat o optimálním návrhu trojfázového transformátoru pro napájení plazmatronu s řízeným usměrňovačem. Transformátory slouží ke snížení, nebo k zvýšení elektrického napětí na výstupní straně transformátoru, při zachování kmitočtu dané elektrické sítě. Využitelnost transformátorů je veliká, od malých transformátorů používaných ve spotřebičích v domácnostech, až po výkonové transformátory používající se při distribuci elektrické energie.

Při návrhu trojfázového transformátoru jsem se řídil několika podmínkami. Jednou z podmínek bylo dodržení tří hodnot elektrického proudu dodávaného do plazmatronu. A to pro elektrické proudy 300, 500 a 1000A, kterým odpovídají transformátory s výkony 250, 400 a 800kVA dle normy ČSN 35 100. Další podmínkou pro návrh trojfázového transformátoru v této bakalářské práci je zpětný vliv řízeného usměrňovače a proměnlivý elektrický proud odebíraný plazmatronem. Nato aby byl plazmatron napájen musí být v obvodu zařazen řízený usměrňovač pro usměrnění střídavého elektrického napětí a elektrického proudu na stejnosměrnou složku. Samotný plazmatron je zařízení využívající se při generování plazmy, ať už mezi dvěma elektrodami nebo do volného prostoru.

2. Teoretický rozbor: Třífázové výkonové transformátory, základní principy, závislosti, vlastnosti charakteristiky

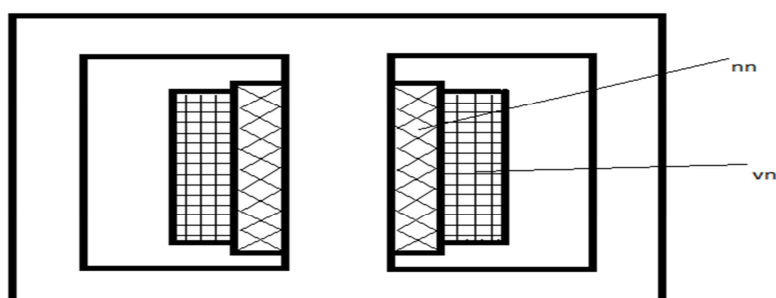
2.1. Definice použití transformátoru

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který pracuje na principu elektromagnetické indukce. Používá se ke změně elektrického střídavého napětí, při stálém kmitočtu. Pro přenos elektrické energie na velkou vzdálenost, je nutné zvýšit velikost napětí pro omezení ztrát energie.

2.2. Dělení transformátorů

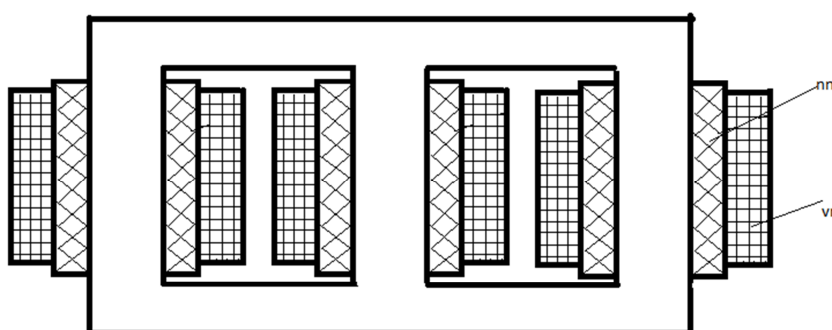
Podle počtu fází

Jednofázové transformátory se většinou používají pro transformaci elektrického napětí směrem dolů, tedy na nižší hladinu elektrického napětí. Většinou se používají pro malé výkony, desítky až stovky wattů. Jednofázové transformátory, které mají dvě cívky pro jednu fázi a to primární cívku a sekundární cívku. [3] [7] [10]



Obrázek 1 - Jednofázový plášťový transformátor

Třífázové transformátory jsou tvořeny třemi jednofázovými transformátory, nebo transformátor s trojfázovým magnetickým obvodem. Používají se především pro přenos a distribuci elektrické energie. Jejich výkony dosahují až stovek megawattů.



Obrázek 2 - Třífázový jádrový transformátor

Podle provedení magnetického obvodu

Transformátory plášťové mají rozvětvený magnetický obvod, který z částí překrývá vinutí daného transformátor. V jednofázovém transformátoru, jádrového provedení jsou vinutí umístěna na dvou jádrech. Toto se provádí z důvodu pevnější magnetické vazby, aby nedocházelo k větším magnetickým tokům, které mají tak vazbu s jedním vinutím transformátoru.

Podle použití transformátoru

Měníče počtu fází se používají pro napájení elektrických pecí, polovodičových měničů a dalších zařízení, které vyžadují změnu počtu fází střídavého proudu.

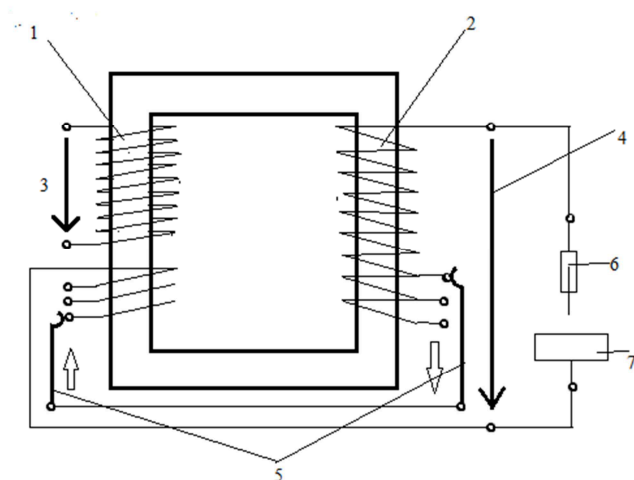
Usměrňovací transformátory jsou konstruovány pro napájení usměrňovačů střídavým elektrickým napětím potřebné hodnoty, počtu fází a fázového posunu. Jejich hlavní zvláštnost je v tom, že na výstupním obvodu transformátoru je zapojený příslušný usměrňovač, který propouští elektrický proud pouze jedním směrem. Usměrňovací transformátory jsou definované v normě ČSN 35 1170

Transformátory - měniče kmitočtu je možné změnit kmitočet střídavého elektrického proudu pomocí transformátoru. V praxi se využívají pro získání dvojnásobného a trojnásobného kmitočtu. Kdyby bylo zapotřebí zvětšit kmitočet více krát, než 2x nebo 3x, bylo by nutné použít kaskádního spojení transformátoru se značnou spotřebou aktivních materiálů.

Pecové transformátory jsou konstruovány pro napájení indukčních, obloukových a odporových elektrických pecí a vysokofrekvenční ohřev.

Transformátory s plynulým řízením elektrického napětí jsou například taková, která pro řízení změny elektrického napětí mění počet závitů v jednom vinutí. Při tomto způsobu se musí použít přepínač či přepojovač odboček. To, ale při časté změně elektrického napětí není z provozních důvodů výhodné.

Pro obloukové svařování se používají transformátory s charakteristickým přerušovaným chodem a rychlé přechody ze stavu naprázdno do stavu nakrátko a naopak. Při obloukovém svařování je nutné snížit elektrické napětí síťové na zápalnou hodnotu, která je 40 až 70V.



Obrázek 3 - Náčrt transformátoru pro obloukové svařování 1-Vstupní vinutí, 2-Výstupní vinutí, 3-Síťové napětí, 4-Svařovací napětí, 5-Spínač, 6-Svařovací elektroda, 7-Obráběný materiál

Zkušební transformátory se používají v laboratořích výzkumných ústavů nebo v závodech, které potřebují ke kontrole izolačních hladin daných strojů a přístrojů. Pro tuto kontrolu se používají kaskády transformátorů pro dosažení napětí 10^6V i více.

Malé zvláštní transformátory se používají v telekomunikačních a radiotechnických zařízeních, v průmyslové elektronice, v měřicí technice a další technice pro nejrůznější transformace střídavého proudu. Na tyto transformátory jsou kladeny zvláštní požadavky.[9]



Obrázek 4 - Malý zvláštní transformátor

Vzduchem chlazené transformátory se budují do obytných budov z důvodu zajištění proti požáru. Vinutí transformátoru vzduchem chlazeným se izoluje sklem a teplovzdorným lakem. Ve srovnání s olejovými transformátory mají vzduchové transformátory větší izolační vzdálenosti, menší proudové hustoty ve vinutí a menší indukci v magnetickém obvodu. [5] [7] [10] [15]

Tlumivky jsou stroje, které se v mnohých případech zapojují ve střídavých elektrických zařízeních do obvodu. Využívá se jejich indukčnost pro omezení a řízení elektrického proudu. [6] [7] [10]

Přístrojové transformátory elektrického proudu a napětí

Slouží k oddělení obvodů s měřicími nebo jistícími přístroji od elektrické sítě s vyšší hladinou elektrického napětí, čímž je umožněna bezpečná manipulace s přístroji.

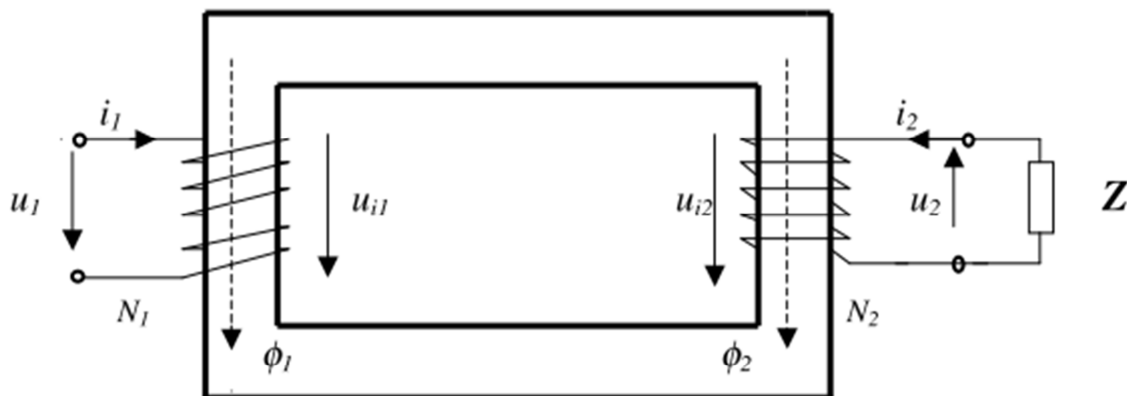
Transformaci elektrického proudu a napětí na hodnoty, které můžeme měřicími přístroji měřit.

Přístrojové transformátory (měřicí a jistící) jsou definovány normou ČSN 35 1360

2.3. Základní principy, závislosti, vlastnosti charakteristiky

Princip transformátoru

Na primární vinutí transformátoru připojíme elektrické střídavé sinusové napětí o okamžité hodnotě u_1 , začne vinutím protékat střídavý elektrický proud i_1 , který vybudí střídavý magnetický tok Φ_1 . Tento magnetický tok naindukuje na sekundární vinutí indukované napětí u_2 . Po připojení zátěže Z k sekundární straně vinutí začne jím protékat střídavý elektrický proud o okamžité hodnotě i_2 . Na základě Lenzova principu je magnetický tok Φ_2 vytvořen elektrickým proudem i_2 reakční a musí tedy působit proti smyslu magnetického toku Φ_1 . [7] [10] [15]



Obrázek 5 - Princip transformátoru

Odvození indukovaného napětí

Na příkladu pro odvození indukovaného napětí je možno názorně ukázat, že derivace má nejenom matematický význam. Víme, že okamžitá hodnota indukovaného napětí v cívce je dána indukčním zákonem ve tvaru:

$$u_i = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Pokud vyjdeme z předpokladu, že magnetický indukční tok má sinusový charakter, pak je jeho okamžitá hodnota dána vztahem:

$$\Phi = \Phi_{max} \cdot \sin\omega$$

Po dosazení do předešlé rovnice dostaneme vztah:

$$u_i = \frac{N \cdot d(\Phi_{max} \cdot \sin\omega t)}{dt}$$

Z matematické analýzy víme, že derivace složené funkce, je součin derivací funkcí vnější a funkce vnitřní. Vnější funkci je zde sinus úhlu, derivací je cosinus úhlu. Vnitřní funkce je argument ωt , jeho derivací je podle času ω . Po provedení derivace se dostaneme ke vztahu:

$$u_i = N\omega\Phi_{max} \cdot \cos\omega t$$

V elektrotechnice pracujeme obvykle s efektivními hodnotami. Proto při přepočtu efektivní hodnoty na hodnotu maximální použijeme $\sqrt{2}$. Funkce má pro své maximum $\cos \Phi = 1$, pak tedy můžeme napsat tvar pro maximální hodnotu elektrického napětí:

$$U_{max} = N\omega\Phi_{max}$$

S využitím vztahu pro úhlovou frekvenci $\omega = 2\pi f$ a přechodem na efektivní hodnotu se dostáváme ke vztahu:

$$U_i = \sqrt{2}\pi N f \Phi$$

Převod transformátoru

Převod transformátoru definujeme jako podíl indukovaných napětí na primární a sekundární straně transformátoru. Pro ideální transformátor platí, že ztráty se rovnají nule a současně nekonečně velkou magnetickou vodivost. Pro ideální transformátor můžeme psát:

$$U_1 = U_{i1} = \sqrt{2}\pi f \Phi N_1$$

$$U_2 = U_{i2} = \sqrt{2}\pi f \Phi N_2$$

Podílem těchto rovnic dostaneme:

$$P = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že poměr elektrického napětí je dán poměrem počtu závitů primárního a sekundárního vinutí. Pro ideální transformátor předpokládáme, že vazební reaktance je nekonečně velká, tedy magnetizační proud tekoucí cívkou je nulový. Podobně jako pro magnetické toky, tak i pro magnetické napětí musí platit princip superpozice:

$$F_{m1} + F_{m2} = 0$$

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0$$

Je třeba říci, že okamžitá hodnota elektrického proudu na sekundární straně směřuje proti okamžité hodnotě elektrického proudu na primární straně. Proto, výraz přechází pro absolutní hodnoty na tvar:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

Z toho tvaru vyplývá vztah pro proudový převod:

$$P = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Výraz nám naznačuje, že elektrické proudy se přepočtou nepřímo úměrně počtu závitů primárního a sekundárního vinutí transformátoru. Je zapotřebí zdůraznit, že v praxi se udává převod u energetických transformátorů nad 5kVA jako poměr elektrického napětí při chodu naprázdno. U menších transformátorů, malých výkonů se udává jako napěťový poměr při jmenovitém zatížení. [7] [10] [15]

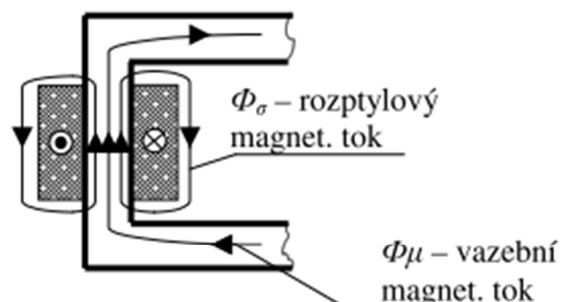
Náhradní schéma transformátoru

Při sestavování náhradního schématu skutečného transformátoru, vycházíme z energetické bilance. Musíme také respektovat činný odpor vinutí, konečnou magnetickou vodivost vazebního obvodu. Dále musíme respektovat i skutečnost, že ne všechny magnetický tok je uzavřen vazebním magnetickým obvodem, ale část se uzavírá bez užítu vzduchem. Činný odpor lze určit podle vztahu:

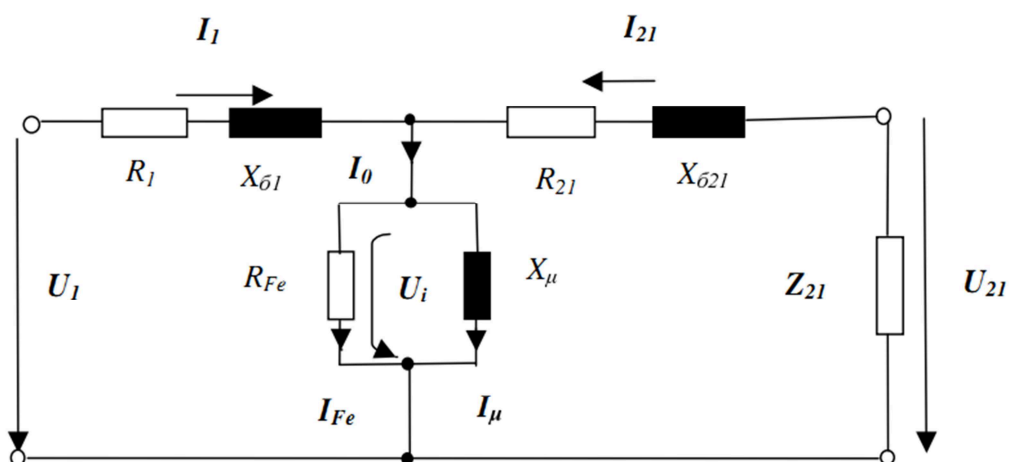
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Délku vodičů určíme součinu počtu závitů N a střední délky závitů. Hodnota odporu vinutí je nutno ještě přepočítat na provozní teplotu vinutí. Konečná hodnota elektrické vodivosti má za důsledek vznik Joulových ztrát, které určíme ze vztahu $\Delta P_j = mRI^2$, kde m znamená počet fází.

U skutečného transformátoru vznikají ztráty v železe, které jsou způsobené konečnou magnetickou vodivostí. Tyto ztráty v železe budou tvořeny ztrátami vířivými proudy a hysterezí. Značíme je obvykle ΔP_{Fe} . V náhradním schématu zavedeme tyto ztráty rezistivitou železných plechů, zařazenou paralelně k magnetizační reaktanci X_μ . Do náhradního schématu musíme zahrnout ještě rozptylovou reaktanci X_σ . Ke vzniku rozptylového magnetického toku, který se uzavírá kolem vlastní cívky, dojde jak u primárního, tak u sekundárního vinutí. [7] [10] [15]



Obrázek 6 - Magnetický tok



Obrázek 7 - Náhradní schéma transformátorů

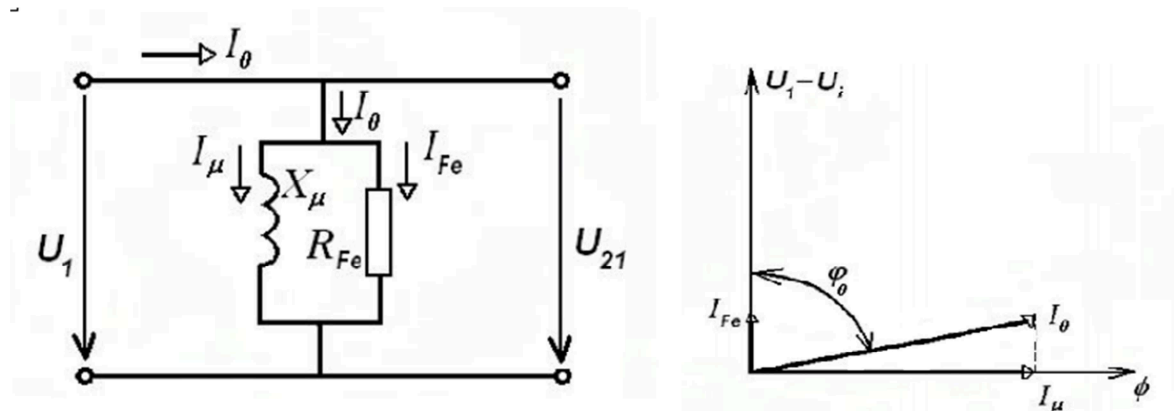
Legenda k obrázku č. 7

- U_1 napájecí napětí primární strany transformátoru
- U_{21} svorkové napětí sekundární strany přepočtená na primární stranu
- U_i vnitřní indukované napětí
- I_1 primární napětí
- I_{21} sekundární proud přepočtený na primární stranu
- I_0 proud naprázdno
- I_μ magnetizační proud

- I_{Fe} proud na krytí ztrát v železe
- R_1 odpor vinutí primární cívky
- R_{21} odpor vinutí sekundární cívky přepočtený na primární stranu
- $X_{\sigma 1}$ rozptylová reaktance primárního vinutí
- $X_{\sigma 21}$ rozptylová reaktance sekundárního vinutí přepočtená na primární stranu
- R_{Fe} odpor zahrnující ztráty v železe
- X_{μ} magnetizační reaktance
- Z_{21} impedance zátěže

Chod transformátoru naprázdno

Při tomto stavu je transformátor na výstupních svorkách rozpojen, neboli nemá připojenou žádnou zátěž, odpor se rovná nekonečnu. Na sekundární cívce tudíž neprotéká sekundární elektrický proud. Stav, kdy transformátor pracuje naprázdno, umožňuje určit některé důležité vlastnosti transformátoru. [7] [10] [15]



Obrázek 8 - Náhradní schéma transformátoru a fázorový diagram

$$U_1 = (Z_1 + Z_0) \cdot I_1$$

$$U_1 = -p_{21} Z_0 I_1$$

$$I_0 = I_1$$

Vlastnosti určené při měření transformátoru naprázdno

Převod, který se rovná poměru vstupního napětí k napětí výstupnímu při chodu naprázdno. Plyne z rovnice:

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{Z_1 + Z_0}{P_{21} Z_0} \right) \approx P_{21} = \frac{N_1}{N_2}$$

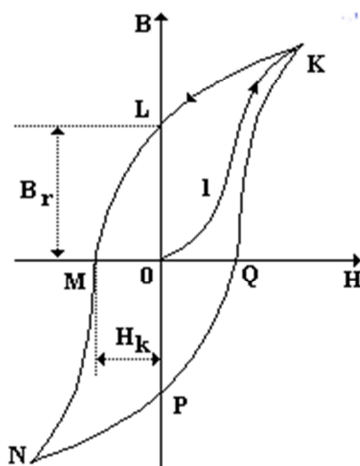
Impedance Z_0 je zpravidla stokrát větší než Z_1 , proto je poměr napětí při chodu naprázdno roven poměru závitů. Fázový úhel napětí U_1 a napětí U_2 je téměř 180° .

Elektrický proud naprázdno I_0 se může vyjádřit v poměrných jednotkách, jako podíl $i_0 = I_0/I_{1n}$, nebo v procentech $i_0 = (I_0/I_{1n}) \cdot 100$, kde i_0 je elektrický proud naprázdno. I_0 naměřená hodnota. U trojfázového transformátoru je vzorec pro elektrický proud naprázdno i_0 :

$$i_0 = \frac{I_{0a} + I_{0b} + I_{0c}}{3 \cdot I_{1n}}$$

Ztráty naprázdno pro trojfázový transformátor:

$$\Delta P_0 = 3U_0 \cdot I_0 \cdot \cos\varphi_0$$



Obrázek 9 - Hysterezní smyčka

- B_r remanentní magnetická indukce (zbytková magnetická indukce)
- H_k koercitivní intenzita magnetického pole

Hysterezní smyčka tvořena body KLMNPQK je důležitá charakteristika feromagnetických látek. Dá se s této charakteristiky určit hysterezní ztráty, které mají za příčinu nežádoucí zahřívání feromagnetických materiálů.

Dělí se na materiály:

Magneticky tvrdé materiály – mají širokou hysterezní smyčku, jsou více odolné proti zmagnetizování. Chovají se jako permanentní magnety.

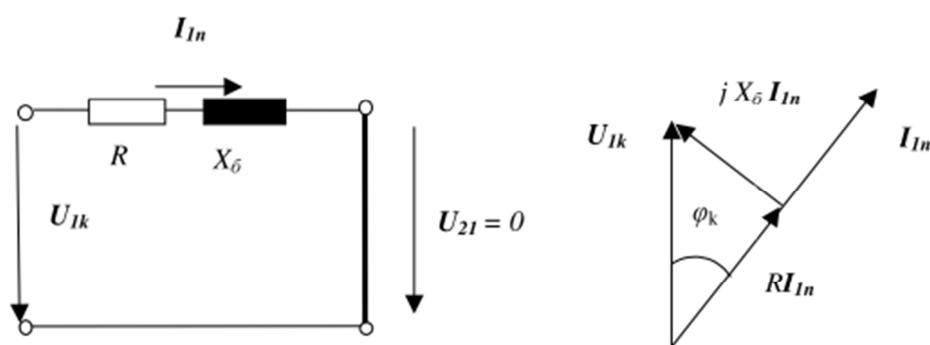
Magneticky měkké materiály – tyto materiály mají úzkou hysterezní smyčku, dají se lehce zmagnetizovat. [7] [10] [15] [19]

Chod nakrátko

Ve stavu transformátoru nakrátko je sekundární vinutí spojeno do zkratu, elektrické napětí U_2 se rovná nule. Rozlišují se dva stavy chodu transformátoru nakrátko.

Transformátor je připojen na jmenovité napětí. Nastane zkrat na sekundárním vinutí, proběhne přechodový děj a následně vinutím může protékat elektrický proud až 25 násobek jmenovitého elektrického proudu. Jouleovy ztráty ve vinutí budou 625x větší, než jsou ztráty jmenovité. Vlivem velkého tepla, dojde ke zničení transformátoru.

Měření transformátoru nakrátko je stav, kdy na primární stranu transformátoru připojíme elektrické napětí nakrátko. Napětí nakrátko je takové elektrické napětí, pro které protéká vinutím jmenovitý elektrický proud transformátoru. [7] [10] [15]



Obrázek 10 - Náhradní schéma transformátoru nakrátko a fázorový diagram

Podle náhradního schématu transformátoru nakrátko vidíme, že ztráty vznikají jen ve vinutí. Vznikají Jouleovy ztráty definované vztahem:

$$\Delta P_j = m \cdot R \cdot I^2$$

U energetických transformátorů se v praxi udává jako štítková hodnota procentní napětí nakrátko definované vztahem:

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1n}} \cdot 10^2 \quad [\%, V, V^{-1}]$$

Výkonové transformátory mají procentní napětí nakrátko 3 – 6%. Trvalý proud nakrátko je dán vztahem:

$$I_k = \frac{U_n}{Z} = \frac{U_k}{u_k} \cdot 10^2 \cdot \frac{1}{Z} = \frac{U_k}{u_k} \cdot 10^2 \cdot \frac{I_n}{U_k}$$

Neboli:

$$I_k = \frac{I_n}{u_k} \cdot 10^2$$

Účinnost transformátoru

Účinnost transformátoru se mezi údaji výrobce nevyskytuje. Výrobce garantuje ztráty naprázdno a jmenovité ztráty nakrátko při jmenovitém elektrickém proudu protékajícím vinutím. Účinnost se mění v závislosti na $\cos \varphi$. Výkonová účinnost je dána vztahem:

$$\eta = \frac{P}{P_2} \cdot 10^2$$

Kde:

- P – výkon transformátoru
- P_2 - příkon transformátoru

Budeme-li počítat výkonovou účinnost při jmenovitém zatížení, použijeme vztah:

$$\eta = \frac{S_n \cdot \cos \varphi}{S_n \cdot \cos \varphi + \Delta P_0 + \Delta P_k} \cdot 10^2$$

V energetice se navrhují transformátory tak, aby měly nejvyšší účinnost při jmenovitém, tedy stoprocentním zatížení. Předpokládá se, že transformátor nebude v provozu plně zatížen. Proto se navrhuje tak, aby mělo maximální účinnost při výkonu kolem 75%. [7] [10] [15]

3. Specifika a dimenzování transformátorů pro řízené polovodičové usměrňovače

3.1. Plazmové technologie

Plazma

Plazma je tvořena kladnými ionty a elektrony. Je považována za čtvrté skupenství látky, má velkou vodivost a silně reaguje na elektrická i magnetická pole, má také velkou tepelnou kapacitu. Nejenom že silně reaguje na elektrické a magnetické pole, ale i schopné generovat elektrické a magnetické pole.

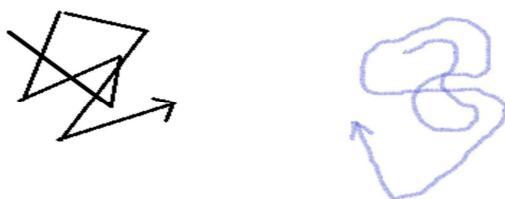
Dělení plazmy:

- Běžné plazma - volné elektrony atomu látky jsou zodpovědné za plazmatický stav této látky
- Termonukleární plazma - toto plazma se nachází v jádrech hvězd kde, probíhá termojaderná syntéza
- Nukleonové plazma - toto plazma můžeme nalézt ve vnějších obalech explodujících supernovách
- Kvar-gluonová plazma – tento stav látky se podařilo vytvořit v urychlovači částic v CERNu roku 2000

Člověk vytvořil plazma i v laboratorních podmínkách, například:

- Laserové plazma – doba života $10^{-12} \div 10^{-9}$ s
- Pulsní plazma – doba života $10^{-9} \div 10^{-6}$ s
- Tokamak – doba života 1 s
- Studené plazma – doba života až roky

Z jedním nejdůležitějším parametrem, který určuje chování plazmatu je stupeň ionizace. Stupeň ionizace plazmatu je dán poměrem počtu ionizovaných částic vůči celkovému počtu částic. Odlišný charakter srážek i jejich mechanismus se liší od srážek neutrálních částic. Při srážce neutrálních částic dochází k náhlým změnám směru pohybu částice. Kdežto u plazmatu je tento pohyb méně náhlý, spíše většinou tvořen elektrickým polem.



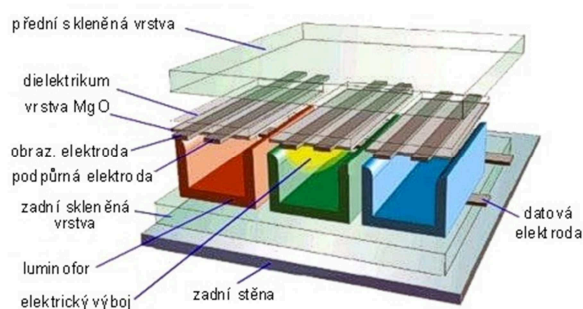
Obrázek 11 -Pohyb částic v neutrálním plynu a v plazmatu

Elektrická vodivost plazmatu je dána charakterem srážek částic. Vodivost dále pak závisí na hustotě plazmatu a především na teplotě. Teplota má opačný vliv na vodivost než u kovu, kdy s rostoucí teplotou roste elektrický odpor a tím i vodivost. U plazmy s teplotou vodivost stoupá, protože účinný průřez srážek klesá. Průchodu elektrického proudu plazmatem může bránit nízká hustota => malý počet volných nosičů náboje.

Plazmové technologie

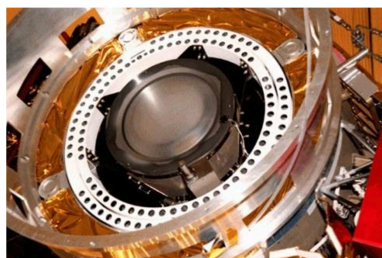
Plazma se využívá dlouhodobě již ve výbojkách, dále se pak využívají plazmové technologie v nanášení tenkých vrstev materiálů, nanášení tvrdých vrstev látky, plazmové obrazovky, plazmové motory, plazmové řezání, ale i k recyklaci odpadu a v dalších odvětvích. Níže se některé z nich stručně přiblížíme a nakonec v této kapitole více přiblížíme plazmatron, pro který je v této bakalářské práci navrhován transformátor.

- **TOKAMAK** – je to zařízení, které uskutečňuje spojování atomových jader. Nebo-li termojadernou syntézu. Z lehčích jader vznikne při fúzi dvou jader jádro těžší a uvolní se energie. Toto má větší energetický zisk oproti štěpení jader.
- **Plazmový zobrazovač** - je zařízení určené k zobrazování, která pracuje na principu elektrického výboje v plynu za sníženého tlaku cca 55 až 75 kPa.



Obrázek 12 - Struktura plazmového panelu

- **Magneto-Plazmové motory** - se používá jako palivo plyn, vodík, hélium nebo vzácné plyny. MP motor je tvořen dvěma komory, ta první je magnetická a vstřikuje se do ní palivový plyn, kde je vysokofrekvenčním magnetickým polem ionizováno do vysokoteplotního plazmatu. V druhé magnetické komoře se provádí další zahřívání plazmatu, ale za pomoci mikrovlnných záření. Tepelná energie plazmatu se dále ve výtokové magnetické trysce přeměňuje na energii kinetickou. [25] [26]

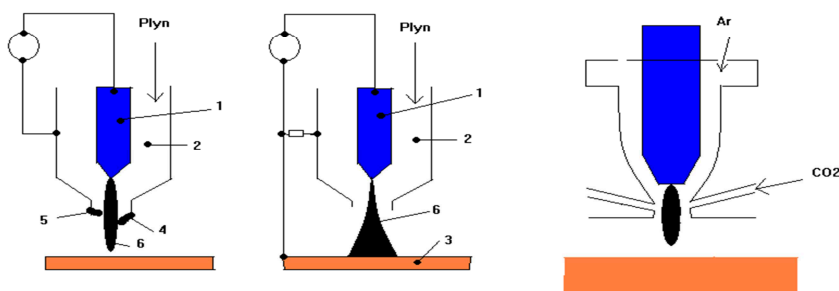


Obrázek 13- Iontový motor

Plazmový generátor

Plazmový generátor se dělí:

- Plazmové generátory s elektrodami.



Obrázek 14 - Principiální schéma plazmových generátorů s elektrodami

Popis obrázků:

- 1 - wolframová tyčová katoda
- 2 – měděná anoda s vodním chlazením
- 3 – opracováváný materiál
- 4 – vnější anoda
- 5 – vnitřní anoda
- 6 – plazma

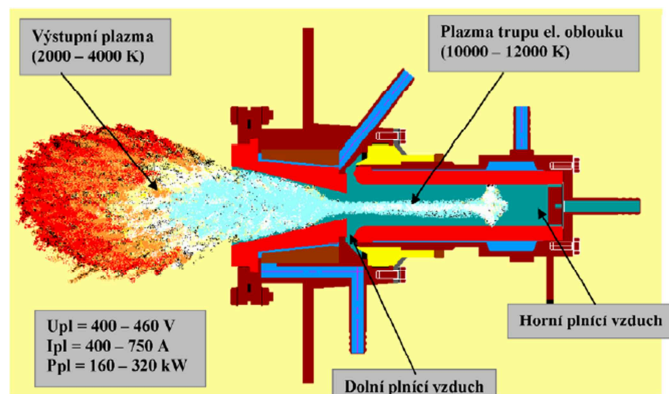
Plazmové generátory s vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem

U plazmových generátorů s elektrodami vzniká plazma mezi dvěma elektrodami, které jsou připojeny na stejnosměrný zdroj. Elektrody jsou z wolframu a jako pracovní plyn je použit kyslík. Výše na obrázku č. 14 jsou tři generátory plazmatu. První je s vyfukovaným výbojem a přímým připojením na stejnosměrný zdroj. Druhý je ze, stejnosměrným zdrojem paralelně připojeným na zpracovaný materiál a anodu. Třetí je se samostatným přívodem plynu, argonu a pracovního plynu CO_2 .

U technologií, kde je potřeba dodržovat vysoké čistoty, nejsou moc vhodné elektrodové generátory plazmatu z důvodu nečistot. Pro technologie s vysokou čistotou jsou vysokofrekvenční indukční generátory tzv. **plazmatrony**.

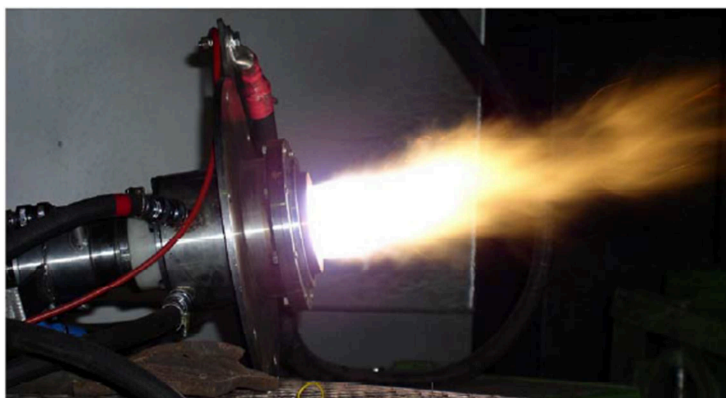
Plazmový generátor GNP320

Pro plazmový generátor GNP320, navrhuji v této bakalářské práci trojfázové transformátory s výkony 250kVA, 400kVA a 800kVA, tak aby byl dodáván elektrický proud 300A, 500A a 1000A. Tento plazmatron GNP320 je určen, pro vytvoření a zajištění dodávky nízkoteplotní plazmy o daném množství a teplotě tak, aby její působení v prostoru komory určené pro přípravy uhlé směsi, která je součástí hořáku, zajistilo rozklad uhlé prášku a inicializovalo jeho hoření na ústí hořáku do spalovací komory.



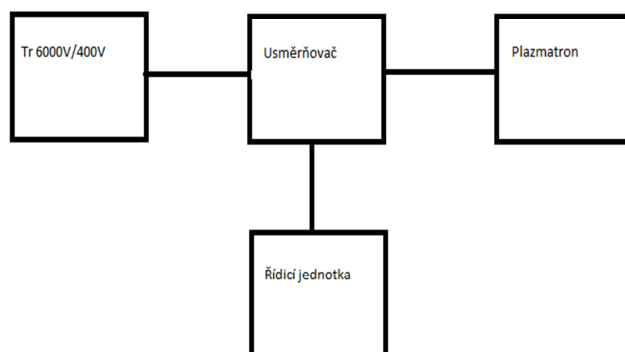
Obrázek 15 - Princip rozložení oblouku v plazmatronu

Tento plazmatron s elektrickým výkonem 320kW, který je určen pro tuto technologii výše uvedenou, pracuje na principu silně stabilizovaného stejnosměrného elektrického oblouku. Tento elektrický oblouk uvnitř plazmatronu je formován systémem plnicího tlakového plazma-tvořícího vzduchu. Tento plnicí vzduch má za úkol formovat prostředí mezi dvěma elektrodami, aby prostředí bylo stabilní a hořící elektrický oblouk taktéž. A dále unášet horký obal trupu oblouku do volného prostoru. [24] [25]



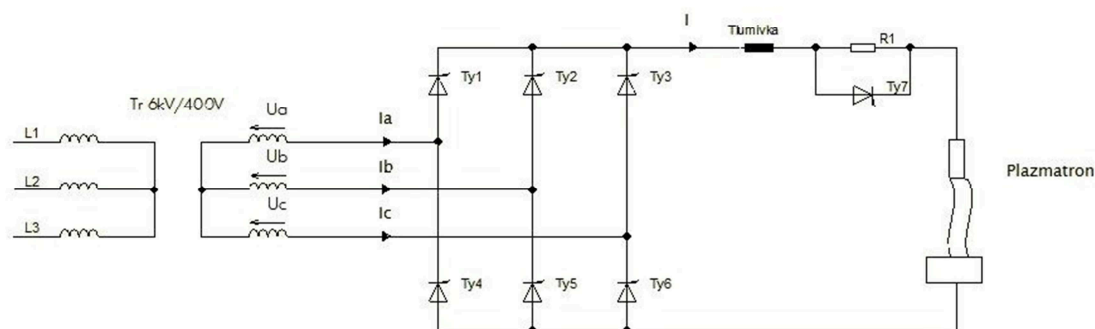
Obrázek 16 - Plazmový hořák GNP320

Silový obvod plazmatronu



Obrázek 17 - Blokové schéma

Obvod plazmatronu je tvořen trojfázovým transformátorem s elektrickým napětím 6000V/400V, dále pak trojfázovým můstkovým tyristorovým usměrňovačem, který je řízen řídicí jednotkou a samotným plazmatronem.



Obrázek 18 - Schéma zapojení plazmatronu

V elektrickém obvodu je zapojen v kladné větvi rezistor R_1 a sním v sérii tlumivka. Při startu plazmatronu dojde do 5s odpojení rezistoru pomocí paralelně připojeného tyristoru Ty_7 . Tlumivka a rezistor jsou v obvodu z důvodu přechodového děje, který probíhá od okamžiku zapálení plazmy do doby započetí regulace napětí regulátorem v řídicí jednotce tyristorů. Je důležité, aby hodnoty indukčnosti tlumivky a odporu rezistoru R_1 byly nastaveny správně, abychom zamezili případným výpadkům jisticím prvkům v silové části plazmatronu. V případě výpadku jisticích prvků by došlo k přerušení startu plazmatronu a musel by se start opakovat, doté doby než by se plazmu podařilo vygenerovat. [27]

Technický popis zařízení

Řídicí jednotka třífázového polo řízeného usměrňovacího můstku má specifické vlastnosti a odlišuje se od klasických řídicích jednotek pro regulaci indukčních a odporových zátěží. Řídicí jednotka pro řízení elektrického napětí na plazmatronu je zkonstruována tak, že před aktivací vysokonapěťového zapalovacího zdroje jsou tyristory v třífázovém polo řízeném můstku otevřeny s nejmenším možným řídicím úhlem α , tím pádem je na můstku nejvyšší možné elektrické napětí. Celkový čas potřebný k započítí regulace je složen ze tří časových úseků:

$$t_{cel} = t_1 + t_2 + t_3 \quad [ms]$$

Kde:

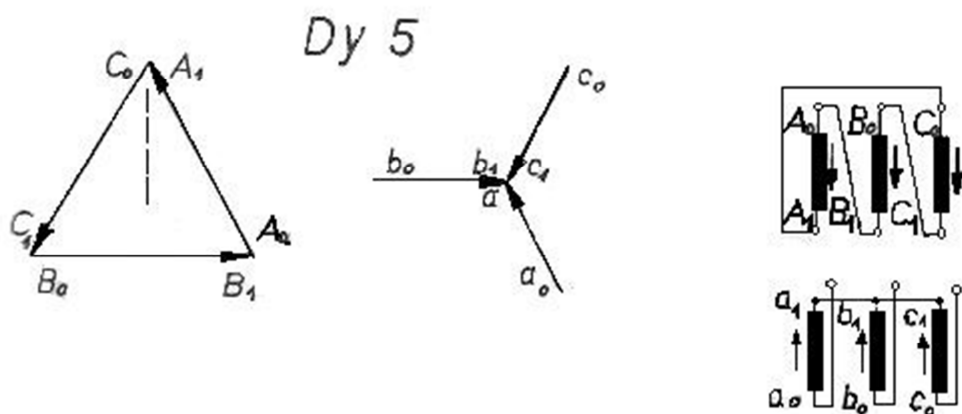
- t_{cel} - celkový čas
- t_1 - časový úsek, ve kterém může dojít k regulaci tyristorů (0 - 150°el. Minus γ , kde γ znamená bezpečnostní úhel)
- t_2 - zpoždění převodníku elektrického proudu zpětné vazby
- t_3 - čas za, který stejnosměrný proud dosáhne nejnižší možné hodnoty, aby mohlo dojít k regulaci napětí

Po celou dobu přechodového děje je nutno silový obvod považovat za neregulovatelný zdroj elektrického napětí se zjednodušující podmínkou, že jeho vnitřní elektrický odpor se rovná nule. Tento zdroj pracuje do sériové zátěže L, R. [27]

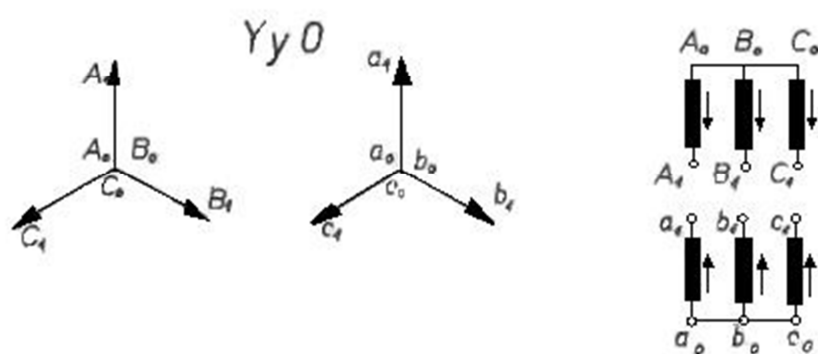
Požadavky na transformátor pro usměrňovač a napájení plazmatronu

Při návrhu třífázového transformátoru pro napájení plazmatronu přes třífázový polo řízený tyristorový usměrňovač musíme zohlednit:

- Vyšší elektrické namáhání vinutí transformátoru komutačními přepětími. Například napěťové impulzy od 1,7 do 2,3 násobku jmenovitého napětí vznikajícím při komutacích tyristorů u blokového transformátoru zatíženého řízeným usměrňovačem při úhlech v blízkosti 90° elektrických při variantě bez komutační tlumivky. V případě použití neřízeného usměrňovače se toto neuvažuje.
- Vyšší tepelné namáhání transformátoru způsobené harmonickými. Doporučuje se výkonové předdimenzování transformátoru o cca 20%. Toto neplatí v případě použití pulzního usměrňovače.
- Dále musíme dbát na mechanické namáhání při rázovém zatěžování (například při 2,5 násobku jmenovitého proudu)
- Pro usměrňovače se nejčastěji používají zapojení vinutí trojfázových transformátorů ve tvaru Dy5 nebo Yy0. [10] [15]



Obrázek 19 - Zapojení vinutí do Dy5



Obrázek 20 - Zapojení vinutí Yy0

Tři fázový polo řízený můstkový usměrňovač

Schéma zapojení je na obrázku č. 21, a průběhy napětí na obrázku č. 22. V okamžiku sepnutí má nejvyšší kladné napětí fáze L_1 (U_a), vodivý je tyristor Ty1 a nejvyšší záporné napětí má fáze L_3 (U_c), vodivý je Ty6. Proud teče z fáze a přes Ty1 do zátěže a zpět přes Ty6 do fáze L_3 . Od okamžiku $\omega t = 0$ je napětí U_b větší než U_a . Tyristor Ty2 ale ještě nedostal zapínací impuls a proto má stále napětí fáze L_1 . Až v okamžiku $\omega t = \alpha$ dostává Ty2 zapínací impuls a proběhne komutace proudu z fáze L_1 na fázi L_2 . Po jejím skončení je na výstupu napětí kladné U_b a U_c je záporné. Po proběhnutí $1/6$ periody nastává tento děj ve spodní polovině usměrňovače mezi tyristory Ty6 a Ty4. V průběhu celé periody se pak vystřídá 6 komutací. [12] [16] [17] [18]

3.2. Obecný postup při návrhu transformátoru

Pro návrh transformátoru musí být tyto údaje:

- zdánlivý výkon S [kVA]
- výstupní a vstupní sdružené napětí U_1 a U_2 [V]
- kmitočet f [Hz]
- zapojení a skupina zapojení vinutí
- způsob chlazení
- druh zatížení – trvalé nebo přerušované zatížení, krátkodobý či přerušovaný chod

Dále jsou normami předepsané tzv. zaručované hodnoty:

- ztráty ve vinutí
- ztráty v železe
- proud naprázdno I_0 v %, jmenovitého proudu
- napětí nakrátko u_K

Postup návrhu:

Z daných zapojení určíme hlavní elektrické veličiny fázové napětí U_{f1} a U_{f2} .

- V trojúhelníku $U_f = U_S$
- Ve hvězdě $U_f = \frac{U_S}{\sqrt{3}}$

Zjistíme zaručované hodnoty ztrát naprázdno, proudu naprázdno a procentního napětí nakrátko (ČSN 35 1110 – vzduchové transformátory, ČSN 35 1120 – olejové transformátory).

Z výkonů a fázových napětí se určí fázové proudy I_{f1} a I_{f2} , přičemž platí:

- $S = 3 \cdot U_f \cdot I_f$ - z fázových hodnot
- $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$

Průřez železa jádra určíme s empirického vzorce:

$$S_{Fe} = C \cdot \sqrt{\frac{S \cdot 10^3}{k \cdot f}} \cdot 10^{-4} [m^2, kVA, Hz]$$

Kde:

- $C = 4 - 6$ pro olejové chlazení
- $C = 6 - 8$ pro vzduchové chlazení
- $k = 1$ pro jednofázový plášťový transformátor
- $k = 2$ pro jednofázový jádrový transformátor
- $k = 3$ pro trojfázový jádrový transformátor

Volbou C můžeme ovlivnit poměr železa a mědi.

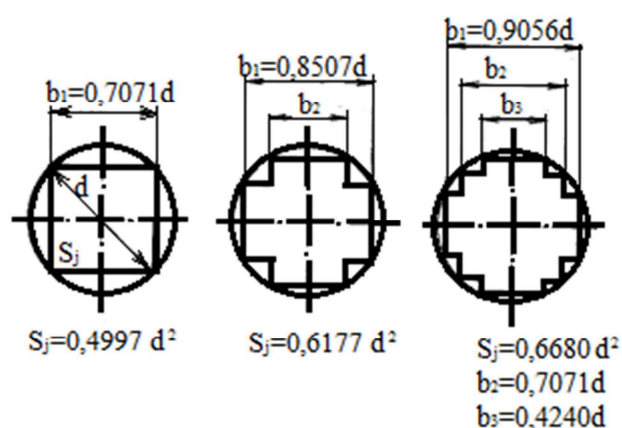
Geometrický průřez železa je větší, z důvodu izolace mezi plechy, které k sobě těsně nepřiléhají. Je dán vztahem:

$$S_j = \frac{S_{Fe}}{\alpha}$$

Kde činitel plnění:

- $\alpha = 0,87 - 0,94$ pro plechy válcované za tepla
- $\alpha = 0,87 - 0,96$ pro plechy s keramickou izolací

Tvar průřezu jádra volíme odstupňovaný.



Obrázek 23 - Odstupňovaný tvar jádra.

Magnetická indukce závisí na výkonu a lze ji určit z rovnice:

$$B = 1,1 + 0,14 \log S \text{ [T, kVA] do 5 MVA výkonu}$$

Magnetický tok:

$$\phi = B \cdot S_{Fe} \text{ [Wb, T, m}^2\text{]}$$

Počet závitů N_2 určíme z indukovaného napětí na 1 závit U_{iN}

$$U_{iN} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \text{ [V, Wb, Hz]}$$

$$\text{a } N_2 = \frac{U_2}{U_{iN}}$$

U lomené hvězdy:

$$N_2 = 1,155 \cdot \frac{U_2}{U_1}$$

Počet závitů zaokrouhlíme na celá čísla, u lomené hvězdy na celé sudé číslo.

- Počet závitů N_1 určíme ze zaokrouhleného počtu závitů N_2 a převodu

$$N_1 = N_2 \cdot \frac{U_1}{U_2}$$

U lomené hvězdy:

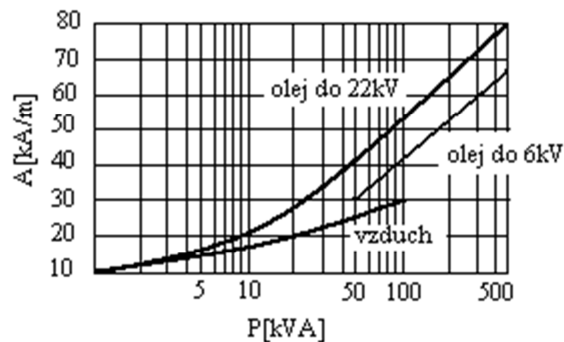
$$N_1 = N_2 \cdot \frac{U_1}{1,155 \cdot U_2}$$

Výška jádra závisí na proudovém zatížení povrchu železa A, která udává celkový elektrický proud, připadající na 1 m výšky jádra. Pro jeho určení jsou zpracovány empirické diagramy, z nichž je můžeme určit v závislosti na chlazení a elektrického výkonu.

Pro trojfázový transformátor pak platí vzorec:

$$A = \frac{I_1 \cdot N_1 + I_2 \cdot N_2}{l} = \frac{2 \cdot I_1 \cdot N_1}{l}$$

$$l = \frac{2 \cdot I_1 \cdot N_1}{A} \quad [m, A, Am^{-1}]$$



Obrázek 24 - Proudové zatížení železa v závislosti na výkonu.

Určení průřezu vinutí pro vypočtené fázové proudy z dovolené proudové hustoty, která je pro olejové transformátory dána vztahem:

Pro měď:

$$J = (1,65 + 0,82 \log S) \cdot 10^6 \quad [Am^{-2}, kVA]$$

Pro hliník:

$$J = (1,5 \text{ až } 2) \cdot 10^6 \quad [Am^{-2}]$$

U lomené hvězdy hodnotu J zmenšujeme 1,075 krát.

Jednotlivé průřezy jsou pak:

$$S_1 = \frac{I_1}{J} \quad S_2 = \frac{I_2}{J}$$

Profil vodiče a izolace se pak volí tabulek vyráběných vodičů. U olejových transformátorů se jako izolace používá nejčastěji ovinutím izolačním papírem. Vodiče do průřezu cca 5 mm^2 se používají kruhové, při vyšších průřezích pak obdélníkového tvaru a u průřezu nad 30 mm^2 se používají paralelní větve vodičů.

Úprava vinutí NN

Mezi vrstvy se vkládá mezivrstvou izolace z lepenky o tloušťce $s_v = 0,2 \text{ až } 0,6 \text{ mm}$

- Izolační vzdálenost se volí podle průměru d a bývá v rozmezí 4 až 10 mm
- Izolační válec pod vinutím je jeho tloušťka $s_i = 2 \text{ až } 3 \text{ mm}$
- Izolační vzdálenost od jádra se pro různá elektrická napětí určí ze vztahu $d_2 = U + 8kV \text{ [mm, kV]}$, při napětí do 500V bývá vzdálenost $d_2 = 15 \text{ mm}$

Výška cívky je:

$$l_{c2} = l - 2d_2$$

Šířku plochého vodiče určíme tak, aby platilo, že:

$$L_{c2} = (1,02 \text{ až } 1,15) \cdot (N_v + 2n_k + 1) \cdot b_i$$

Kde:

- N_v - počet závitů v jedné vrstvě
- n_k - počet vystřídání paralelních vodičů
- b_i - šířka izolovaného vodiče

Konstanta 1,02 až 1,15 zahrnuje i vůli mezi jednotlivými vodiči. Při výpočtu se uvažuje, že na první závit jsou zapotřebí dvě šířky, proto je v závorce připočtena jednička. Šířka holého vodiče je po odečtení izolačního přírůstku b . Po zaokrouhlení na vyráběný průřez se určí jeho tloušťka vodiče $t = S_2/b$, kterou také zaokrouhlíme. Ze skutečné šířky vodiče b_i se vypočítá skutečná výška cívky zpětně.

Tloušťka cívky je podle vztahu:

$$a_2 = (1,04 \text{ až } 1,08) \cdot [n_v \cdot t_i + s_v \cdot (n_v - 1)]$$

Úprava vinutí VN

Mezi vrstvou izolace bývá $s_v = 0,1 \text{ až } 0,12 \text{ mm}$. Izolační vzdálenost mezi vinutími NN a VN závisí na napětí $b = 0,5U + 5kV \text{ [mm, kV]}$.

Tloušťka izolačního válce je započtená v rozměru b a bývá při napětí:

- 6kV 1 x 2 mm
- 10kV 1 x 2 mm
- 22kV 1 x 3 mm
- 35kV 1 x 5 mm
- 60kV 2 x 6 mm
- 100kV 1 x 8 mm + 2 x 6 mm
- 200kV 1 x 8 mm + 3 x 6 mm

Vinutí s obvyklým řízením elektrického napětí v rozsahu 5% má celkově $N_1 + 5\%$ závitů, které je třeba při úpravě rozdělit do jedné či dvou odbočkových cívek, ve kterých bude celkově 2 x 5% z N_1 závitů a několika cívek normálních, které se navrhují tak, aby na jedné cívce bylo elektrické napětí 1-2kV. Rozdělení závitů do cívek je třeba navrhnout tak, aby tloušťka všech cívek byla stejná. To dosáhneme tím, že zvolíme vhodnou volbou počtu poloh a počtu závitů v jedné poloze. Volba se dělá zkusmo.

Mezi jednotlivé cívky se vkládají distanční vložky z lesklé lepenky tloušťky $S_c = 2$ až 3mm, nebo se dělají olejové kanály široké asi 6 mm. Izolační vzdálenost od železa je podobná jako u cívky NN:

$$d_1 = U + 8kV \text{ [mm, kV]}$$

Volná délka pro závity cívky VN je:

$$l_{c1} = l - 2d_1 - n_{sc} \cdot s_c$$

Šířka cívky je:

$$b_c = (1,03 \text{ až } 1,06) \cdot (N_v + 1) \cdot d_i$$

Tloušťka cívky A je:

$$a = (1 \text{ až } 1,04) \cdot [n_v \cdot d_i + (n_v - 1) \cdot s_p]$$

Skutečná výška celé cívky VN je:

$$l_{c1} = \sum b_c + n_{sc} \cdot s_c$$

Kde:

- n_{sc} je počet distančních vložek mezi cívkami
- d_i je průměr izolovaného vodiče

Vzdálenost os jader:

$$M = d + c + 2 \cdot (a_1 + a_2 + e + b)$$

Kde c je izolační vzdálenost mezi vinutími dvou sousedních fází.

$$c = 0,7U + 7kV \text{ [mm, kV]}N$$

Spojka má šířku rovnou šířce jádra $b_s = b_1$. Při stejné indukci ve spojkce jako v jádře je:

$$S_j = S_{Fe} \text{ a výška spojky je:}$$

$$h_s = \frac{S_j}{b_s} \text{ [m, m}^2, \text{m]}$$

Po zaokrouhlení vypočítáme skutečný geometrický průřez S_s . [10] [13]

3.3. Kontrola výpočtu pro obecný návrh transformátoru

Kontrola převodu:

$$\Delta p = \frac{p_u - p_n}{p_u} \cdot 100 \text{ [%]} \text{ (nesmí být větší než } 0,5\%)$$

Hmotnost vinutí:

$$m_1 = 1,05 \cdot \pi \cdot d_{s1} \cdot N_1 \cdot S_1 \cdot \gamma \text{ [kg, m, m}^2, \text{kgm}^{-3}]$$

$$m_2 = \pi \cdot d_{s2} \cdot N_2 \cdot S_2 \cdot \gamma$$

$$\gamma_{Cu} = 8890 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\gamma_{Al} = 2700 \text{ kgm}^{-3}$$

Odpor vinutí:

- průměr středního závitu

$$R_1 = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_{s1} \cdot N_1}{S_1} \cdot d_{s1}$$

- činitel dodatečných ztrát:

$$R_2 = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_{s2} \cdot N_2}{S_2} \cdot (1 + k) \quad (1 + k) - k = \frac{g \cdot g^{-0,2}}{9} \cdot h^4 \text{ [- , -, cm]}$$

- g – počet paralelních větví jednoho závitu
- h – výška holého vodiče jedné paralelní větve

Odpor jedné fáze:

$$R = R_1 + R_{21}$$

$$R_{21} = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

Pro lomenou hvězdu:

$$R_{21} = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \cdot 1,1555 \right)^2$$

Reaktance rozptylové indukčnosti jedné fáze, s přepočtem na vstupní stranu.

$$X_\sigma = 8 \cdot f \cdot N_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot d_s}{l_c} \cdot \left(b + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \cdot 10^{-6} \text{ [\Omega, Hz, m]}$$

$$l_c = \frac{l_{c1} + l_{c2}}{2} \quad d_s = \frac{d_{s1} + d_{s2}}{2}$$

Impedance jedné fáze:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_\sigma^2}$$

Napětí nakrátko:

$$U_K = I_1 \cdot Z$$

Ztráty nakrátko (celkové ztráty ve vinutí):

$$\Delta P_j = 3\Delta P_{j1} + 3\Delta P_{j2}$$

$$\Delta P_{j1} = I_1^2 \cdot R_1 \quad \Delta P_{j2} = I_2^2 \cdot R_2$$

Hmotnost spojek a jader magnetického obvodu:

$$m_j = 3 \cdot S_j \cdot l \cdot \alpha \cdot \gamma \quad [kg, m^2, m, -, kgm^{-3}]$$

$$m_s = 2 \cdot S_s \cdot l_s \cdot \alpha \cdot \gamma \quad \text{kde } \gamma = 7600 \text{ } kgm^{-3}$$

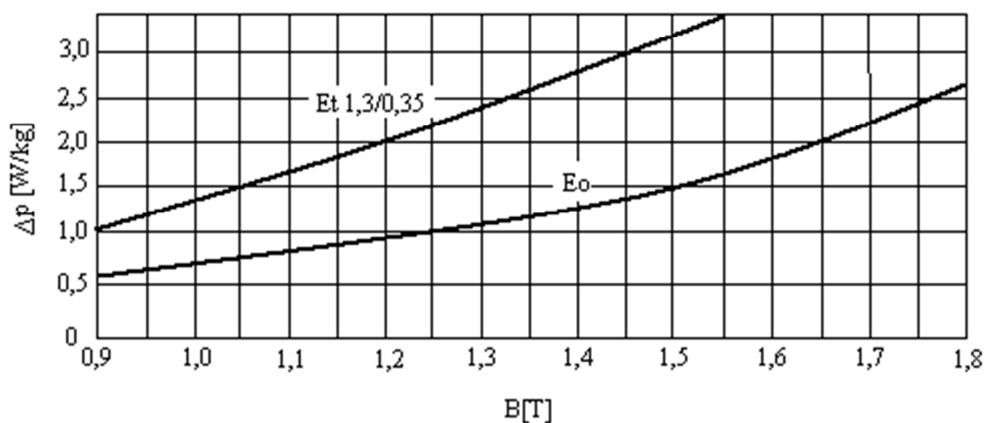
Magnetická indukce v železe je dána upraveným počtem závitů a napětím:

$$B_j = \frac{U_1}{4,44 \cdot S_{Fe} \cdot f \cdot N_1} \quad [kg, m^2, m, -, kgm^{-3}]$$

$$B_s = B_j \cdot \frac{S_j}{S_s}$$

Ztráty v železe, které se vypočítají z měrných ztrát (určíme je z grafu na obrázku č. 25.)

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} = k \cdot (\Delta p_{Bj} \cdot m_j + \Delta p_{Bs} \cdot m_s) \quad [W, -, Wkg^{-1}, kg]$$



Obrázek 25 - Ztráty transformátorových plechů (Et válcované za tepla, Eo válcované za studena).

Proud naprázdno:

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2}$$

Ztrátový proud se určí ze ztrát v železe:

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{3U_1} [A, W, V,]$$

Magnetizační proud se určí z měrného magnetizačního příkonu:

$$I_{\mu} = \frac{\Delta q_j \cdot m_j + \Delta q_s \cdot m_s}{3U_1} [A, VA, kg^{-1}, kg, V]$$

Účinnost při jmenovitém zatížení a při $\cos \varphi = 1$

$$\eta = \frac{P_n - \Delta P_0 - \Delta P_k}{P_n} \cdot 100 [\%, kVA, kW]$$

Trvalý proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_1}{Z} \text{ při účinníku } \cos \varphi_k = \frac{R}{Z}$$

4. Typová volba a dimenzování transformátoru pro řízený usměrňovač

Při návrhu transformátorů bylo počítáno s třemi požadovanými hodnotami elektrického proudu dodávaného do plazmatronu a to 300, 500 a 1000A. Tomu odpovídají výkony transformátorů dle normy ČSN EN 35 100 s hodnoty pro dodržení požadovaných elektrických proudů o výkonech 250, 400 a 800kVA.

4.1. Konkrétní postup při výpočtu olejového transformátoru 250kVA

Výkon $S = 250\text{kVA}$, napětí primární strany 6kV a napětí sekundární strany 400V . Spojení vinutí $Yy0$, frekvence 50 Hz .

Prvně si zvolíme plechy o tloušťce $0,35\text{ mm}$ a měrných ztrátách $z_{10} = 1,35\text{ W/kg}$ kterou jsme určili z magnetizační křivky. Dále si spočteme aktivní průřez jádra při konstantě $c = 5$:

$$S_j = c \cdot \sqrt{\frac{S}{3 \cdot f}} \cdot 10^4 = 5 \cdot \sqrt{\frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 50}} \cdot 10^4 = 2,075 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Zvolíme tedy aktivní průřez jádra $S_j = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$. Plechy budou oboustranně lakované s činitelem plnění železa $k_z = 0,9$ takže geometrický průřez jádra bude:

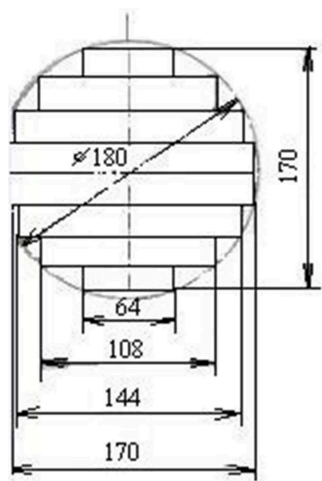
$$S'_j = \frac{S_j}{k_z} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{0,9} = 2,22 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Dále zvolíme čtyřstupňové jádro s průřezem jádra a průměrem kružnice opsané, bude roven:

$$D_j = (4,2 \div 4,8) \cdot \sqrt[4]{S} = (4,2 \div 4,8) \cdot \sqrt[4]{250} = (4,2 \div 4,8) \cdot 3,97 = 16,7 \div 19 \text{ cm}$$

Položíme $D = 180\text{ mm}$. Profil průřezu je na obrázku 28. Zvolíme indukci v jádře $B_j = 1,4\text{ T}$. Pak bude magnetický tok roven:

$$\Phi = B_j \cdot S_j = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 1,4 = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$



Obrázek 26 - Průřez jádra transformátoru

Indukované napětí na jeden závit je tedy:

$$u_z = 4,44 \cdot \Phi \cdot f = 4,44 \cdot 2,8 \cdot 10^{-2} \cdot 50 = 6,2 \text{ V}$$

Primární vinutí:

$$\text{Fázové napětí } U_{1f} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3460 \text{ V}$$

$$\text{Fázový proud } I_{1f} = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{250000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 24,1 \text{ A}$$

Vinutí je válcové a v každé fázi je jedna větev. Zvolíme-li proudovou hustotu $\sigma_1 = 3,4 \text{ A/mm}^2$, bude průřez vodiče:

$$s_1 = \frac{I_{1f}}{\sigma_1} = \frac{24,1}{3,4} = 7,1 \text{ mm}^2$$

Počet primárních závitů je:

$$N_1 = \frac{U_{1f}}{u_z} = \frac{3460}{6,2} = 570$$

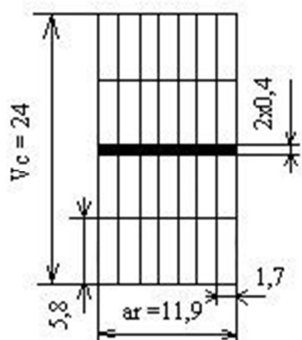
Odbočky na primárním vinutí 5%:

- stupeň 3460V – 5%, počet závitů $N'_1 = 570 - 28 = 542$
- stupeň 3460V, počet závitů $N_1 = 570$
- stupeň 3460V + 5%, počet závitů $N''_1 = 570 + 28 = 598$

Předběžná určená výška jádra pro proudové zatížení jádra bude:

$$A = 6,1 \cdot 10^4 \text{ A/m}, B_j = 1,4 \text{ T}, S_j = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ tedy:}$$

$$h_j = 450 \cdot \frac{S}{3 \cdot B_j \cdot A \cdot f \cdot S_j} = 450 \cdot \frac{250}{3 \cdot 1,4 \cdot 6,1 \cdot 10^4 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} = 0,44 \text{ m}$$



Obrázek 27 - 7 vrstev v každé vrstvě 2 závitů

Vinutí transformátoru provedeme z dvoj cívek. Regulační cívka má sedm vrstev, v každé vrstvě dva závitů. Polohové napětí je $e_p = 2 \cdot 6,2 = 12,4V$. Napětí jedné dvojčívky se rovná $e_c = 28 \cdot 6,2 = 176V$. Celkem jsou dvě regulační cívky.

Tloušťka regulační cívky:

$$a_1 = 7 \cdot 1,7 = 11,9 \text{ mm}$$

Výška regulační cívky:

$$v_c = 4 \cdot 5,8 \div 0,8 = 24 \text{ mm}$$

Mezi polovinami dvoj cívky je vložena lepenka o tloušťce $2 \cdot 0,4 \text{ mm}$. Kmenové vinutí bude mít tedy 542 závitů. V kmenovém vinutí provedeme celkem šest cívek:

- 4 cívky o 88 závitů /11 vrstev a 8 závitů = 352 závitů
- 1 cívka o 110 závitů /11 vrstev a 10 závitů = 110 závitů
- 1 cívka o 80 závitů /8 vrstev a 10 závitů = 80 závitů
- Celkem = 542 závitů

Celkový počet dvoj cívek je šest kmenových cívek a dvě regulační cívky, celkem tedy 8 cívek.

Celkový počet závitů na výšku bude:

- kmenové vinutí $4 \cdot 8 = 32$ závitů
- $1 \cdot 10 = 10$ závitů
- $1 \cdot 10 = 10$ závitů
- $2 \cdot 4 = 8$ závitů
- Celkem 60 závitů

Mezi dvoj cívkami budou chladicí štěrbiny o výšce 4 mm.

Výška primárního vinutí bude:

- Závity - 348 mm
- Chladicí štěrbiny - 28 mm
- Izolační vložky ve, dvoj cívkách - 6,4 mm
- Celkem $h_{v1} = 382,4$ mm, po stlačení $h_{v1} = 381$ mm
- Tloušťka kmenových dvoj cívek v 11 vrstvách $11 \cdot 1,7 = 18,7 = 19$ mm

Sekundární vinutí

Fázové napětí:

$$U_{2f} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}$$

Fázový proud:

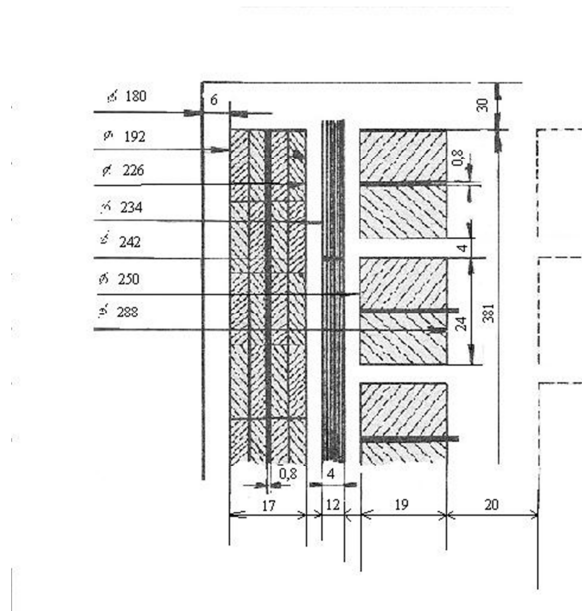
$$I_{2f} = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 362 \text{ A}$$

Při proudové hustotě $\sigma_2 = 3,4 \text{ A/mm}^2$ bude pak průřez vodiče:

$$s_2 = \frac{I_{2f}}{\sigma_2} = \frac{362}{3,4} = 106,5 \text{ mm}^2$$

Volíme dva pásy paralelně $2 \cdot 16 \cdot 3,5 / 2 \cdot 16,3 \cdot 3,8 / 2P$ o průřezu $s_2 = 112 \text{ mm}^2$.

Skutečná proudová hustota tedy bude: $\sigma_2 = \frac{362}{112} = 3,23 \text{ A/mm}^2$



Obrázek 28 - Dispozice vinutí v okně transformátoru

Počet závitů:

$$N_2 = \frac{U_{2f}}{u_z} = \frac{231}{6,2} = 38$$

Provedeme tedy válcové vinutí o dvou vrstvách. Počet závitů v jedné vrstvě pak bude $0,5 \cdot 38 = 19$. Uprostřed vinutí se provede transpozice vodičů. Vodiče se vinou naplocho. Vůle mezi jednotlivými vodiči je si 6%.

Výška NN vinutí bude:

$$h_{v2} = 1,06 \cdot (19 + 1 + 2) \cdot 16,3 = 381 \text{ mm}$$

Krajové výplně budou:

$$h_i = h_j - h_{v2} = 440 - 381 = 59 \text{ mm}$$

Nahoře bude výška výplně 30mm a dole 29mm.

Polohové napětí je $e_p = 19 \cdot 6,2 = 118 \text{ V}$. Mezi obě vrstvy se přidá lesklá lepenka $2 \cdot 0,4 = 0,8 \text{ mm}$. Tloušťka vinutí nn bude rovna:

$$\Delta_2 = (1,04 \div 1,08) \cdot (2 \cdot 2 \cdot 3,8 \div 0,8) = 1,06 \cdot 16 = 17 \text{ mm}$$

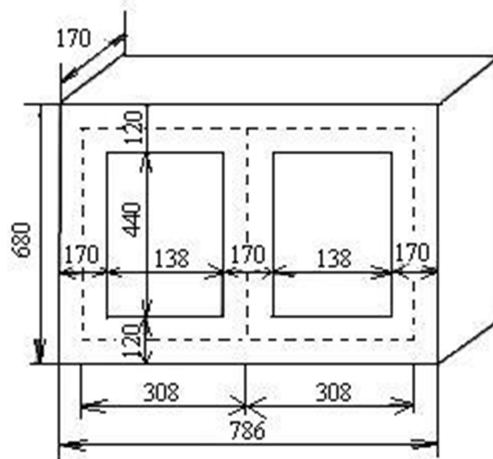
Diagonála	180	180 mm
Vůle mezi jádrem a vinutím NN	$2 \cdot 6 = 12$	192 mm
Vinutí NN	$2 \cdot 17 = 34$	226 mm
Axiální chladicí kanál mezi vinutím VN a NN	$2 \cdot 8 = 16$	242 mm
Izolační válec	$2 \cdot 4 = 8$	250 mm
Vinutí VN	$2 \cdot 19 = 38$	288 mm
Mezera mezi vinutím VN sousedních jader	20	308 mm
Rozteč jader		308 mm

Kontrola nasycení:

$$B_j = \frac{U_{1f}}{4,44 \cdot S_j \cdot f \cdot N_1} = \frac{3460}{4,44 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 50 \cdot 570} = 1,37 \text{ T}$$

$$B_j = \frac{U_{2f}}{4,44 \cdot S_j \cdot f \cdot N_2} = \frac{231}{4,44 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 50 \cdot 38} = 1,37 \text{ T}$$

Nasycení v jádře položíme rovno nasycení ve spojce $B_j = B_s$, tj. $S_j = S_s$. Šířka spojky je $b_s = b_j = 170 \text{ mm}$.



Obrázek 29 – Magnetický obvod

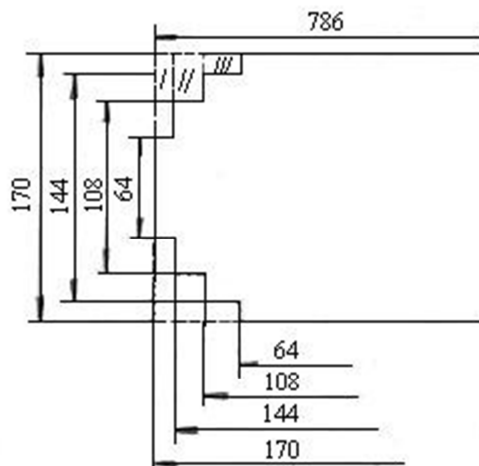
Výška spojky se rovná:

$$h_s = \frac{S_s}{b_s} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{0,17} = 0,188 \text{ m} = 120 \text{ mm}$$

Délka spojky:

$$l_s = 2 \cdot 308 + 170 = 786 \text{ mm}$$

Váha spojky je $G_s = 2 \cdot S_s \cdot l_s \cdot \gamma_z - 8 \cdot (I + II + III)$, kde I, II, III znamená váhu vyčárkovaných částí na obrázku č. 30, je-li váha železa $\gamma_z = 7550 \text{ kg/m}^3$ bude $G'_s = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,786 \cdot 7550 = 238 \text{ kg}$.



Obrázek 30 - Profil spojky

Objemy části I, II, III:

- $I = 120 \cdot 13 \cdot 53 = 82500 \text{ mm}^3$
- $II = 120 \cdot 18 \cdot 31 = 67000 \text{ mm}^3$
- $III = 120 \cdot 22 \cdot 13 = 34400 \text{ mm}^3$
- Celkem 183900 mm^3

Pak:

$$G''_s = 8 \cdot 1,839 \cdot 10^{-4} \cdot 7550 = 11,1 \text{ kg}.$$

Výsledná váha spojek bude:

$$G_s = 238 - 11,1 = 226,9 = 227 \text{ kg}$$

Váha jader bude:

$$G_j = 3 \cdot S_j \cdot l_j \cdot \gamma_z = 3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,44 \cdot 7550 = 200 \text{ kg}$$

Celková váha železa:

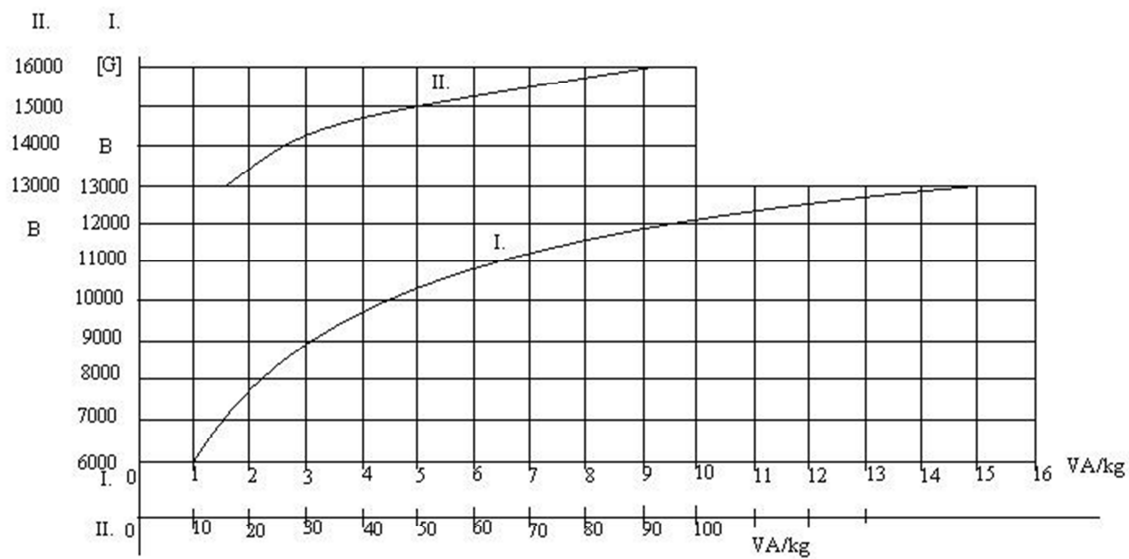
$$G_z = G_s + G_j = 227 + 200 = 427 \text{ kg}$$

Ztráty v železe spočteme za pomoci činitele zvýšení ztrát zpracováním plechů je $k_0 = 1,15$. Tedy:

$$\Delta P_z = k_0 \cdot z_{10} \cdot B^2 \cdot G_z = 1,15 \cdot 1,3 \cdot 1,37^2 \cdot 427 = 1200 \text{ W}$$

Činná složka proudu naprázdno:

$$I_z = \frac{\Delta P_z}{3 \cdot U_{1f}} = \frac{1200}{3 \cdot 3460} = 0,115 \text{ A}$$



Obrázek 31 - Magnetizační spotřeba VA/kg obyčejných transformátorových plechů

Je-li měrný jalový příkon $q = 24 \text{ VAr/kg}$ z diagramu na obrázku 31, pak celkový magnetizační příkon je roven:

$$Q = q \cdot G_z = 24 \cdot 427 = 10300 \text{ VAr}$$

Magnetizační proud:

$$I_m = \frac{Q}{3 \cdot U_{1f}} = \frac{10300}{3 \cdot 3460} = 0,99 \text{ A}, i_m = \frac{0,99}{24,1} \cdot 100 = 4,1\%$$

Proud naprázdno:

$$I_{10} = \sqrt{I_z^2 + I_m^2} = \sqrt{0,115^2 + 0,99^2} = 0,996 \text{ A}$$

Účinník naprázdno:

$$\cos \varphi_{10} = \frac{I_z}{I_{10}} = \frac{0,115}{0,996} = 0,115$$

4.2. Napětí nakrátko a ohmické odpory

Primární vinutí

Střední průměr:

$$d_{s1} = 250 + 19 = 269\text{mm} = 0,269\text{m}$$

Střední délka závitu:

$$l_{z1} = \pi \cdot d_{s1} = \pi \cdot 0,269 = 0,845\text{m}$$

Celková délka primárního vinutí je:

$$L_{z1} = l_{z1} \cdot N_1 = 0,845 \cdot 570 = 482\text{m}$$

Odpor teplé mědi:

$$\frac{1}{\rho} = 46\Omega^{-1}, \text{m}^{-1}, \text{mm}^2$$

$$R_{1t} = \rho \cdot \frac{L_{z1}}{s_1} = \frac{1}{46} \cdot \frac{482}{7,48} = 1,4\Omega$$

Odpor střídavým proudem:

$$k_{př.} = 1,00515$$

$$R_1 = k_{př.} \cdot R_{1t} = 1,00515 \cdot 1,4 = 1,407\Omega$$

Sekundární vinutí

Střední průměr:

$$d_{s2} = 192 + 17 = 209\text{mm} = 0,209\text{m}$$

Střední délka závitu:

$$l_{z2} = \pi \cdot d_{s2} = \pi \cdot 0,209 = 0,655\text{m}$$

Celková délka sekundárního vinutí:

$$L_{z2} = l_{z2} \cdot N_2 = 0,655 \cdot 38 = 24,9\text{m}$$

Odpor teplé mědi:

$$R_{2t} = \rho \cdot \frac{L_{z2}}{s_1} = \frac{1}{46} \cdot \frac{24,9}{112} = 0,00483\Omega$$

Odpor střídavým proudem:

$$k_{př.} = 1,026$$

$$R_2 = k_{př.} \cdot R_{2t} = 1,026 \cdot 0,00483 = 0,005\Omega$$

Sekundární odpor převedený na primární stranu:

$$R'_2 = R_2 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = 0,005 \cdot \left(\frac{570}{38}\right)^2 = 1,125\Omega$$

Celkový odpor převedený na primární stranu je:

$$R_k = R_1 + R'_2 = 1,407 + 1,125 = 2,532\Omega$$

Výpočet reaktance

Střední průměr obou vinutí transformátoru je:

$$d_s = 0,5 \cdot d_{s1} + d_{s2} = 0,5 \cdot (26,9 + 20,9) = 23,9cm$$

Střední obvod:

$$O_s = \pi \cdot d_s = \pi \cdot 23,9 = 75cm$$

Výška vinutí $l_v = 38,1cm$, tloušťka primárního vinutí $\Delta_1 = 1,9cm$, tloušťka sekundárního vinutí $\Delta_2 = 1,7cm$, mezera mezi vinutím vn a nn je $\Delta = 1,2cm$. Pak reaktance se rovná:

$$X_k = \frac{8 \cdot N_1^2 \cdot f}{l_v} \cdot \left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{3} + \Delta\right) \cdot O_s \cdot 10^{-8} = \frac{8 \cdot 570^2 \cdot 50}{38,1} \cdot \left(\frac{1,9 + 1,7}{3} + 1,2\right) \cdot 75 \cdot 10^{-8} = 6,13\Omega$$

Impedance:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{2,53^2 + 6,13^2} = 6,62\Omega$$

Napětí nakrátko:

$$u_k = \frac{Z_k \cdot I_1}{U_{1f}} \cdot 100 = \frac{6,62 \cdot 24,1}{3460} = 4,6\%$$

Účinnost

Ztráty v železe:	ΔP_{Σ}	= 1200W
------------------	---------------------	---------

Ztráty v primární mědi:	$\Delta P_{m1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 1,407 \cdot 24,1^2$	= 2450W
-------------------------	--	---------

Ztráty v sekundární mědi:	$\Delta P_{m2} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 3 \cdot 0,005 \cdot 362^2$	= 1965W
---------------------------	---	---------

Celkové ztráty:	ΔP_{Σ}	= 5615W
-----------------	---------------------	---------

Účinnost:

$$\eta = \frac{S \cdot 10^3}{S + \Delta P_{\Sigma}} \cdot 100 = \frac{250000}{255615} \cdot 100 = 98\%$$

Váha primární mědi:

$$G_{m1} = s_1 \cdot L_{z1} \cdot \gamma_m = 7,48 \cdot 10^6 \cdot 482 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 32,1kg$$

Váha sekundárního vinutí:

$$G_{m2} = s_2 \cdot L_{z2} \cdot \gamma_m = 112 \cdot 10^6 \cdot 24,9 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 24,8kg [10]$$

Vypočtené hodnoty olejových transformátorů 250kVA,400kVA,800kVA

Tabulka vypočtených hodnot olejových transformátorů			
Výkony transformátorů S (kVA)	250	400	800
Aktivní průřez jádra S _j (m ²)	0,02	0,026	0,0365
Geometrický průřez jádra S' _j (m ²)	2,22	2,88	4,05
Průměr kružnice opsané průřezu jádra bude roven D _j (cm)	16,7÷19	18,8÷21,5	22,3÷25,5
Indukce v jádře B _j (T)	1,4	1,4	1,4
Magnetický tok φ (Wb)	0,028	0,0364	0,0511
Indukované napětí na jeden závit uz (V)	6,2	8,1	11,34
Primární vinutí			
Fázové napětí U _{1f} (V)	3460	3460	3460
Fázový proud I _{1f} (A)	24,1	38,5	77
Průřez vodiče s ₁ (mm ²) při σ ₁ = 3,4A/mm ²	7,1	11,4	22,7
Počet primárních závitů N ₁	570	428	306
Odbočky na primárním vinutí ±5%	28	22	16
1. stupeň -5% N' ₁	542	406	290
2. stupeň N ₁	570	428	306
3. stupeň +5% N'' ₁	598	450	3322
Předběžná výška okna h _j (m)	0,44	0,54	0,77
Polohové napětí e _p (V)	12,4	16,2	22,68
Napětí jedné dvoj cívky e _c (V)	176	184,8	181,4
Tloušťka cívky a ₁ (mm)	11,9	14	14
Výška cívky v _c (mm)	24	24,8	48,8

Kmenové vinutí o	542	406	290
Celkový počet závitů na výšku			
Kmenové vinutí	32	28	28
	10	6	13
	10	9	6
	8	8	8
Regulační cívky	8	8	8
Celkem závitů	60	51	55
Chladicí štěrbiny o výšce (mm)	4	4	4
Výška primárního vinutí hv1 (mm)			
Závity (mm)	348	306	660
Chladicí štěrbiny (mm)	28	28	28
Izolační vložky ve dvoj cívkách (mm)	6,4	6,4	6,4
Celkem hv1 (mm)	382,4	340,4	694,4
Po stlačení hv1 (mm)	381	340	693
Tloušťka lamelových dvoj cívek v 11 vrstvách (mm)	19	22	22
Sekundární vinutí			
Fázové napětí U2f (V)	231	231	231
Fázový proud I2f (A)	362	577,4	1154,7
Průřez vodiče s2 (mm2)	106,5	170	340
Počet sekundárních závitů N2	38	29	21
Válcové vinutí o dvou vrstvách →počet závitů v jedné vrstvě	19	15	11
Výška vinutí NN hv2 (mm)	381	477	371
Krajové výplně hi (mm)	59	63	399
Tloušťka vinutí NN Δ2 (mm)	17	16	31

Šířka okna			
Diagonála (mm)	180	180	180
Vůle mezi jádrem a vinutím NN (mm)	12	12	12
Vinutí NN (mm)	34	32	62
Axiální chladicí kanál mezi vinutím NN a VN (mm)	16	20	40
Izolační válec (mm)	8	10	13
Vinutí VN (mm)	38	29	21
Mezera mezi vinutími VN sousedních jader (mm)	20	30	40
Rozteč jader (mm)	308	313	408
Výška spojky h_s (mm)	120	120	120
Délka spojky l_s (mm)	786	796	986
Celková váha spojek G_s (kg)	227	230	287
Váha jader G_j (kg)	200	244	349
Celková váha železa G_{Σ} (kg)	427	474	636
Ztráty v železe ΔP_{Σ} (W)	1200	1332	1787
Činná složka proudu naprázdno I_z (A)	0,115	0,128	0,172
Magnetizační příkon Q (VAr)	10300	11376	15264
Magnetizační proud I_m (A), i_m (%)	0,99;4,1	1,09;2,83	1,47;1,91
Proud naprázdno I_{I0} (A)	0,996	1,1	1,48
Účinník naprázdno $\cos\phi_{I0}$ (-)	0,115	0,116	0,116
Napětí nakrátko, ohmické hodnoty			
Primární vinutí			
Napětí nakrátko u_k (%)	4,6	4,68	4,02
Střední průměr d_{s1} (m)	0,269	0,269	0,318
Střední délka závitu l_{z1} (m)	0,845	0,845	0,999
Celková délka primárního vinutí L_{z1} (m)	482	361	305
Odpor teplé mědi R_{1t} (Ω)	1,4	0,65	0,28

Odpor střídavým proudem R_1 (Ω)	1,407	0,66	0,28
Sekundární vinutí			
Střední průměr ds_2 (m)	0,209	0,208	0,223
Střední délka závitu l_{z2} (m)	0,655	0,653	0,7
Celková délka sekundárního vinutí L_{z2} (m)	24,9	18,9	14,7
Odpor teplé mědi R_{2t} (Ω)	0,00483	0,0023	0,001
Odpor střídavým proudem R_2 (Ω)	0,005	0,0023	0,001
Sekundární odpor převedený na primární stranu R'_2 (Ω)	1,125	0,5	0,21
Celkový odpor převedený na primární stranu R_k (Ω)	2,532	1,1	0,49
Výpočet reaktance			
Střední průměr obou vinutí ds (cm)	23,9	34,25	38,2
Střední obvod O_s (cm)	75	107,6	120
Reaktance X_k (Ω)	6,13	4,06	1,75
Impedance Z_k (Ω)	6,62	4,21	1,81
Účinnost			
Ztráty v železe ΔP_z (W)	1200	1332	1787
Ztráty v primární mědi ΔP_{m1} (W)	2450	2935	4980
Ztráty v sekundární mědi ΔP_{m2} (W)	1965	2300	4000
Celkové ztráty ΔP_z (W)	5615	6567	10767
Účinnost η (%)	98	98,3	98,6
Váha primární mědi G_{m1} (kg)	32,1	38,6	129,2
Váha sekundární mědi G_{m2} (kg)	24,8	29,4	45,8

4.3. Nabídka komerčních transformátorů

Vybral jsem transformátory, dodávané firmami Elpro-energo s.r.o. a KOČÍ-VALÁŠEK s.r.o., přičemž Elpro-energo. dodává transformátory Německé firmy SGB a KOČÍ-VALÁŠEK s.r.o. dodává transformátory BEZ.

Požádal jsem tyto firmy o ceníkovou nabídku podobných transformátorů, pro zjištění průměrné nabízené ceny těchto transformátorů zákazníkům v České republice.

	250kVA	400kVA	800kVA
Elpro-energo s.r.o.	140 000,-Kč	171 000,-Kč	249 000,-Kč
KOČÍ-VALÁŠEK s.r.o	Od 125 000,-Kč	od 145 000,-Kč	od 230 000,-Kč

Ceny výrobců se liší, a to tím, že se různé parametry jednotlivých transformátorů i příslušenstvím k tomu dodávanému. Bližší srovnání transformátorů jsem níže provedl s transformátory nabízenými firmou Elpro-energo s.r.o., která mi zaslala podrobnou cenovou nabídku i s popisem transformátorů jimi nabízenými. [20] [21]

Technické specifikace jednotlivých komponentů

Olejoyé distribuční transformátory s certifikací podle ISO 9001 podle ČSN EN 60076-1+A11, max. teplota okolí a chladicího prostředí ne vyšší než +40°C, max. instalační výška nad hladinou moře 1000 m, trvalé zatížení S1.

- v hermetickém provedení – bezúdržbové (prvních 20 let se nevzorkuje olej)
- pro venkovní a vnitřní instalaci
- kusové zkoušky dle ČSN EN 60076-1+A11
- odolné proti rázovému napětí a zkratu, rázové napětí 150 kV u 22 kV a 190 kV u 35 kV dle ČSN 351100
- olej Nynas Nytro 3000 dle ČSN EN 60156
- materiál vinutí měď
- speciální dvousložkový antikoroziční nátěr, 2x základní, 2x krycí - barevný odstín RAL 7033

Vybavení a příslušenství

- zvedací oka
- zemnicí šrouby
- kolečka přestavitelná pro podélný a příčný pojezd
- teploměrová jímka
- ventil pro výpusť oleje
- hrdlo pro plnění oleje
- keramické průchodky na NN i VN
- výkonový štítek
- od 630 kVA svorníková oka na NN-straně

Specifikace transformátorů SGB se zapojením Yzn1

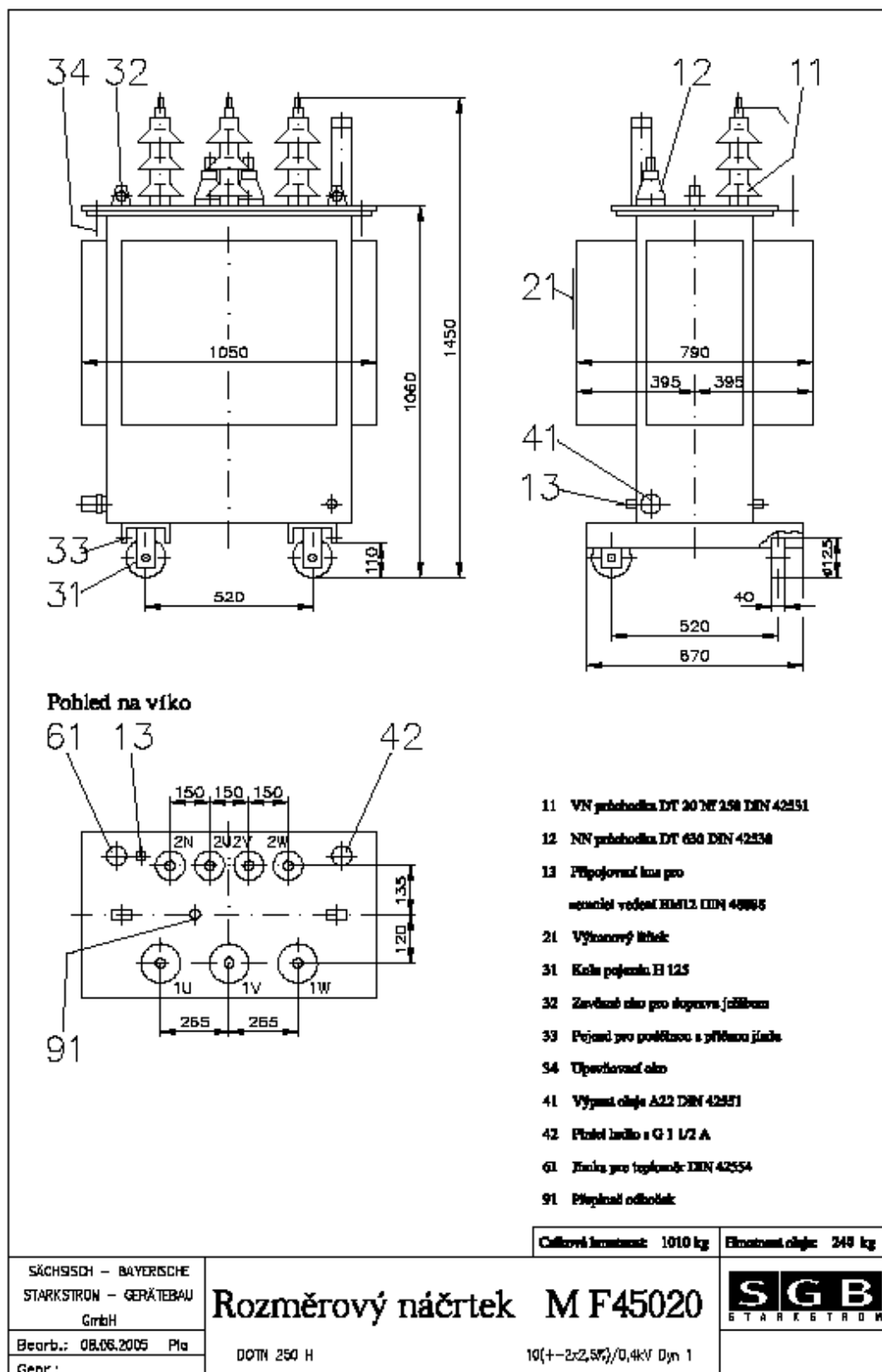
Tabulka 4.1- Hodnoty transformátorů o výkonů 160 – 800kVA zapojením Yzn1

Typ		DOTN 160H/20	DOTN 250H/20	DOTN 400H/20	DOTN 800H/20
Výkon	kVA	160	250	400	800
Vyšší napětí	kV	22	22	22	22
Odbočky u vyššího napětí	%	2 x ± 2,5	2 x ± 2,5	2 x ± 2,5	2 x ± 2,5
Nižší napětí	V	400	400	400	400
Frekvence	Hz	50	50	50	50
Skupina zapojení		Yzn1	Yzn1	Yzn1	Yzn1
Krytí trafo/ svorky VN, NN		IP 54/IP 00	IP 54/IP 00	IP 54/IP 00	IP 54/IP 00
Chlazení		ONAN	ONAN	ONAN	ONAN
Třída izolace		A	A	A	A
Napětí nakrátko	%	4	4	4	6
Ztráty naprázdno	W	390	530	750	1150
Ztráty nakrátko při 75°C	W	3100	4200	6000	10500
Akustický tlak	dB	44	47	49	52
Rozměry					
Délka cca	mm	1050	1110	1350	1750
Šířka cca	mm	730	790	870	1060
Výška cca	mm	1310	1450	1530	1630
Hmotnost cca	kg	840	970	1300	2090
Z toho hmotnost oleje	kg	190	240	310	520
Kolečka střed-střed	mm	520	520	670	670

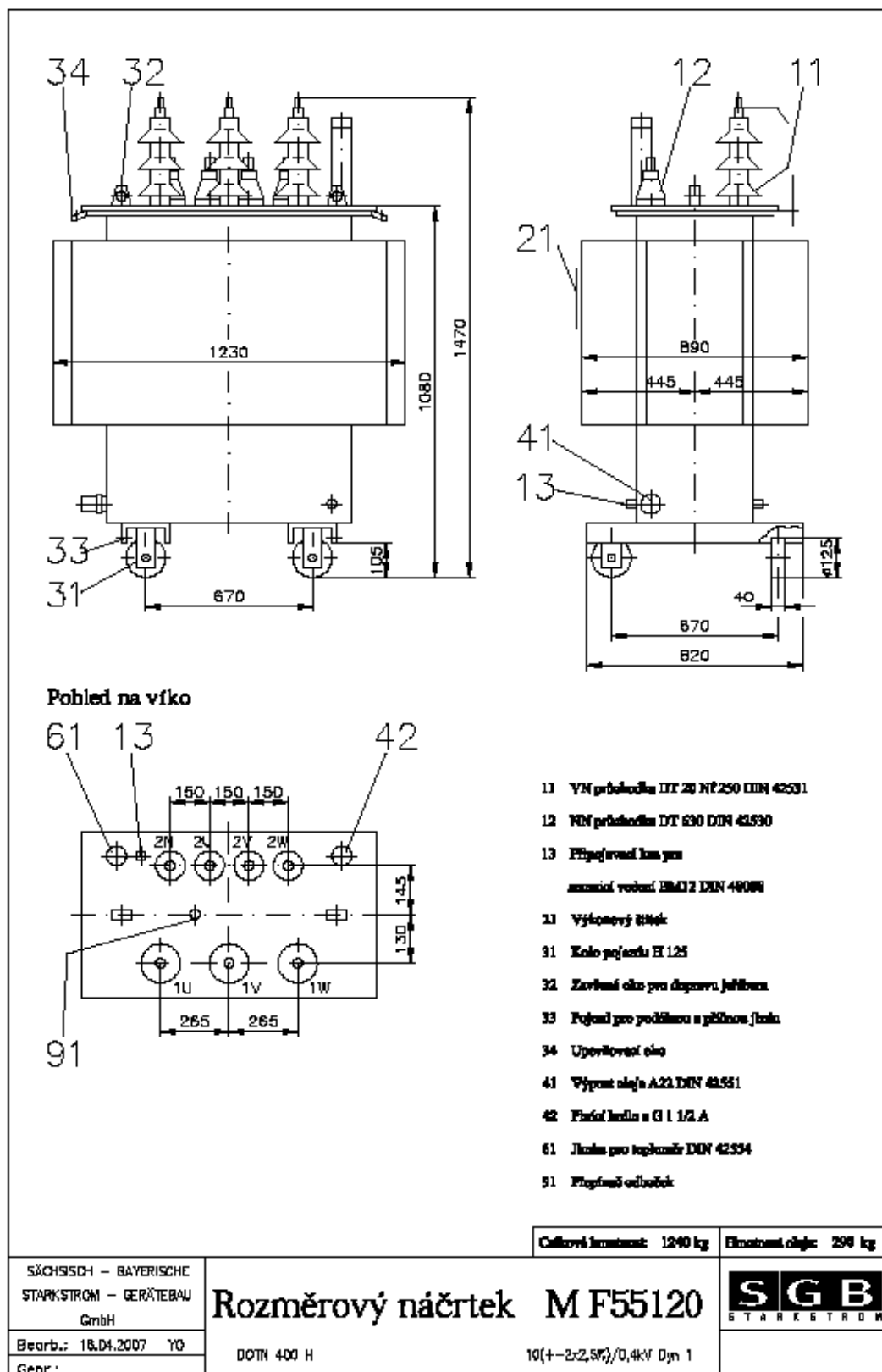
Specifikace transformátorů SGB se zapojením Dyn1

Tabulka 4.2- Hodnoty transformátorů o výkonů 160 – 800kVA zapojením Dyn1

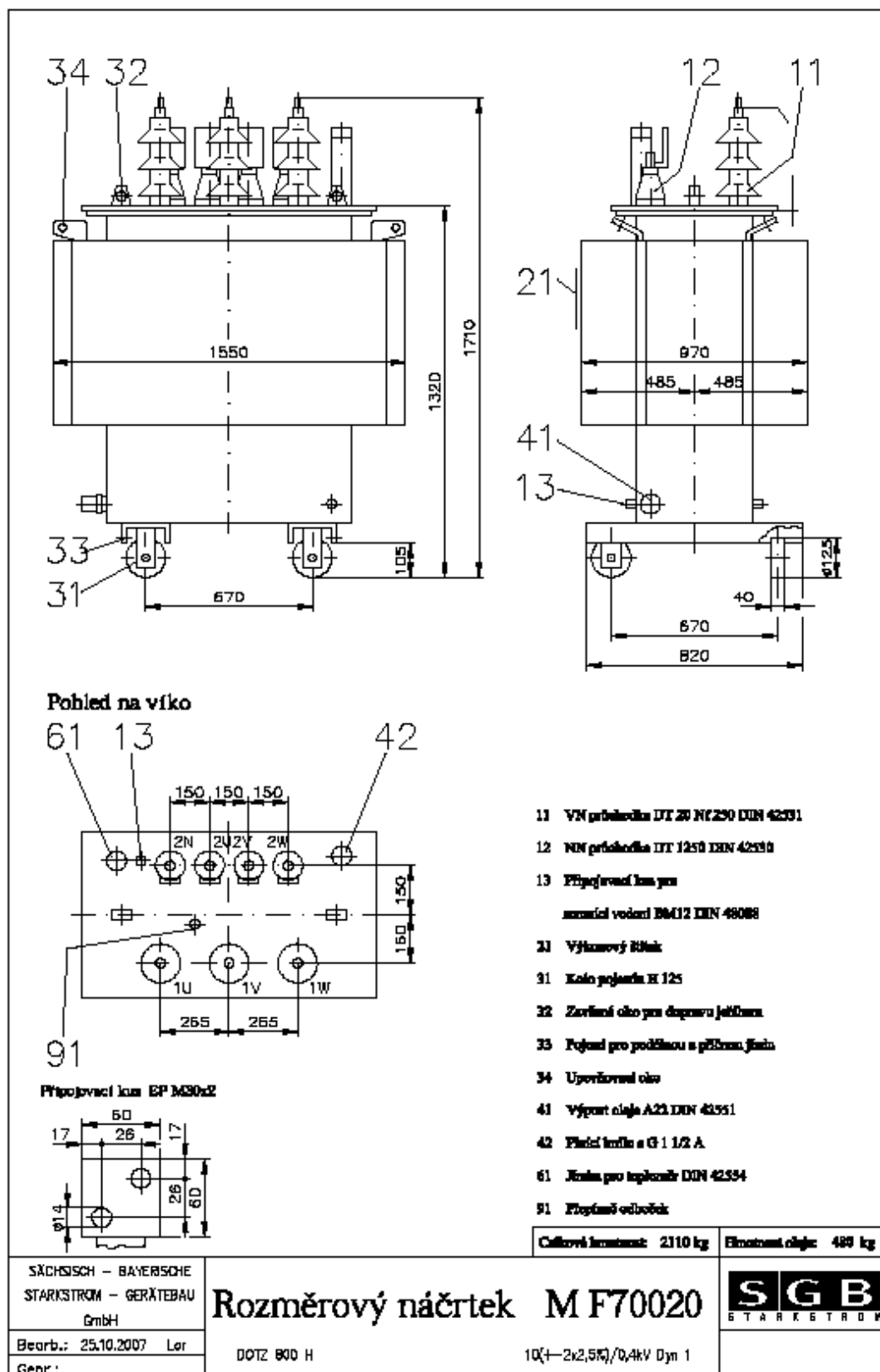
Typ		DOTUL 160H/20	DOTUL 250H/20	DOTUL 400H/20	DOTUL 800H/20
Výkon	kVA	160	250	400	800
Vyšší napětí	kV	22	22	22	22
Odbočky u vyššího napětí	%	2 x ± 2,5	2 x ± 2,5	2 x ± 2,5	2 x ± 2,5
Nižší napětí	V	400	400	400	400
Frekvence	Hz	50	50	50	50
Skupina zapojení		Dyn1	Dyn1	Dyn1	Dyn1
Krytí trafo/ svorky VN, NN		IP 54/IP 00	IP 54/IP 00	IP 54/IP 00	IP 54/IP 00
Chlazení		ONAN	ONAN	ONAN	ONAN
Třída izolace		A	A	A	A
Napětí nakrátko	%	4	4	4	6
Ztráty naprázdno	W	300	425	610	905
Ztráty nakrátko při 75°C	W	2000	2750	3850	7640
Akustický tlak	dB	27	29	31	33
Rozměry					
Délka cca	mm	1200	1260	1350	1650
Šířka cca	mm	720	750	820	890
Výška cca	mm	1530	1550	1640	1720
Hmotnost cca	kg	1170	1390	1780	2530
Z toho hmotnost oleje	kg	290	320	400	580
Kolečka střed-střed	mm	520	520	670	670



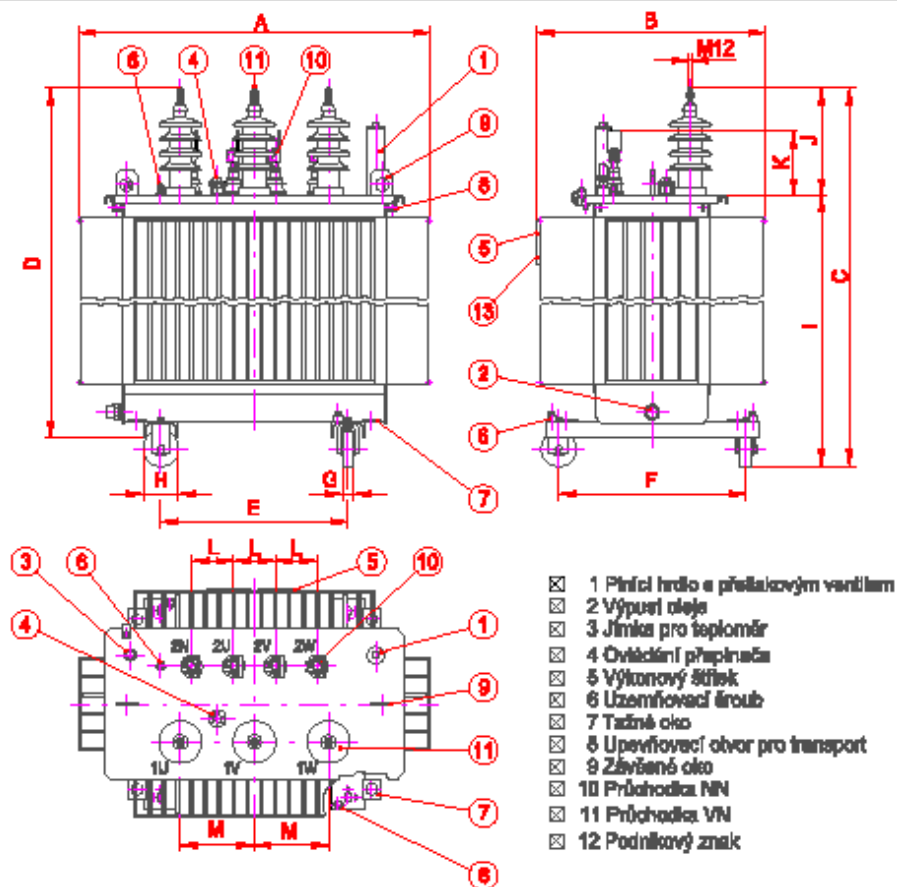
Obrázek 32 -Výkres rozměrů olejového transformátorů 250kVA od firmy ELpro-energo s.r.o



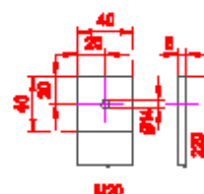
Obrázek 33 - Výkres rozměrů olejového transformátorů 400kVA od firmy ELpro-energo s.r.o



Obrázek 34 - Výkres rozměrů olejového transformátoru 400kVA od firmy ELpro-energo s.r.o

**Приложение NN**


1520



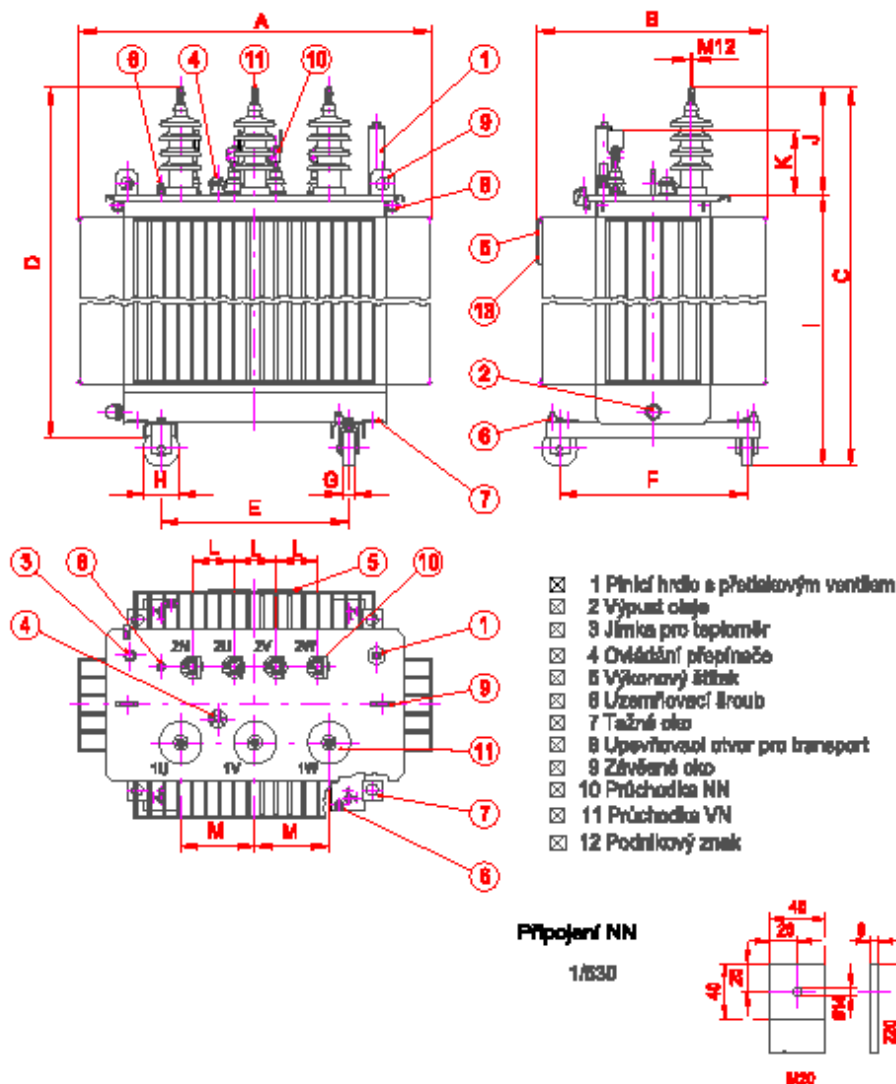
Placemaking y man

Tolerance ± 0.01 mm

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J _{new}	J _{old}	K	L	M
1240	735	1410	1310	620	620	40	126	1036	270	386	220	150	286

 Výrobce: společnost KOCE VALAŠEK s.r.o. v České republice www.transformatory.cz	BEZ TRANSFORMÁTORŮ s.r.o.		EN 60076		
	Hmotnost oleje	180 kg			
	Hmotnost celková	955 kg			
Typ	TCN-10 250/22	Zatíží	Standardní - E ₂ /D ₂	Napětí regulátora s. 75°C	4 %
Výkon	250 kVA	Zatíží nepřetržitě P _n	800 W	Frekvence	50 Hz
Vstupní napětí	6,10,22 ± 2 x 2,5 % kV	Zatíží motorů P _n 75°C	4 200 W	Materiál vinutí VN/NN	Cu/Cu
Výstupní napětí	0,4 kV	Skupina spojů	YznI	Chlazení	ONAN

Obrázek 35 - Výkres rozměrů olejového transformátorů 250KVA od firmy KOČÍ-VALÁŠEK



Rozměry v mm

Tolerance ±20mm

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J _{max}	J _{min}	K	L	M
1370	780	1435	1335	670	670	40	125	1060	270	385	220	150	265

KOČI-VALÁŠEK
 Výrobní podnik strojírenský
 v Českém republice
 www.transformatory.cz

BEZ TRANSFORMÁTORU s.e.

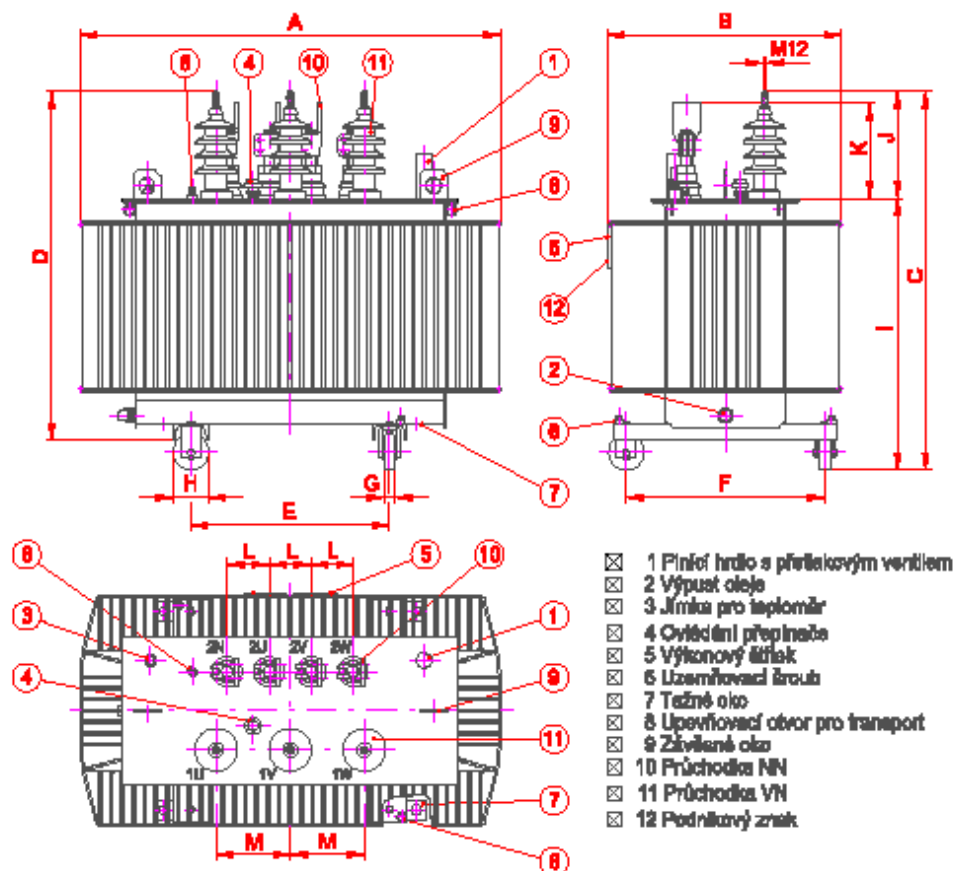
Hmotnost oleje 230 kg

Hmotnost celková 1225 kg

EN 60076

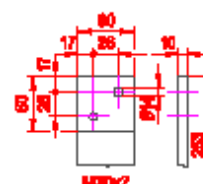
Typ	TOHn 358/Z2	Zrůby	Standardní - E _o D _r	Napětí měřičů u _n 75°C	0 %
Výkon	400 kVA	Zrůby napájecího P _n	330 W	Frekvence	50 Hz
Vstupní napětí	6,10,22 ± 2 x 2,5 % kV	Zrůby měřičů P _n 75°C	6 000 W	Materiál vinutí VMMN	CuCu
Výstupní napětí	0,4 kV	Skupina spojů	Dyn1	Chlazení	ONAN

Obrázek 36 - Výkres rozměrů olejového transformátoru 400kVA od firmy KOČI-VALÁŠEK



Připojení NN


11250



Rooming by V man

Tolerance $\pm 20\text{mm}$

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J _{new}	J _{old}	K	L	M
1680	935	1620	1520	670	670	40	126	1235	270	385	340	150	285

 Výrobci specializovaných transformátorů MVA v České republice www.transformatory.cz	BEZ TRANSFORMÁTORŮ s.r.o.			EN 60076	
	Hmotnost oleje	400 kg			
	Hmotnost celková	2140 kg			
Typ	TDHn 250/22	Zrůty	Standardní - E ₂ O ₂	Napětí měřičů s. 75°C	0 %
Výkon	800 kVA	Zrůty napájecího P.	1 400 W	Frekvence	50 Hz
Vstupní napětí	6,16,22 ± 2 x 2,5 % kV	Zrůty měřičů P. 75°C	16 800 W	Materiál vinutí VN/VN	Cu/Cu
Vstupní napětí	0,4 kV	Skupina spojů	Oyari	Chlazení	ONAN

Obrázek 37 - Výkres rozměrů olejového transformátoru 800kVA od firmy KOČÍ-VALÁŠEK

5. Zhodnocení, závěr

5.1. Zhodnocení

Tabulka 5.1- Srovnání některých parametrů transformátorů SGB a vypočtených

	Výkon (kVA)	Napětí VN/NN (kV)	Zapojení	Napětí nakrátko (%)	Ztráty nakrátko (W)	Hmotnost (kg)
Vypočtený	250	6/0,4	Yy0	4,6	5615	483,9
SGB	250	22;6/0,4	Yzn1	4	4200	970
Vypočtený	400	6/0,4	Yy0	4,68	6567	542
SGB	400	22;6/0,4	Yzn1	4	6000	1300
Vypočtený	800	6/0,4	Yy0	4,02	10767	811
SGB	800	22;6/0,4	Yzn1	6	10500	2090

V tabulce 5.1, je rozdíl hmotností dán tím, že u vypočtených transformátorů je uvedena váha součtem hmotnosti mědi a železa. Není započtena hmotnost oleje, oplechování transformátoru a jiných komponentů jak je dáno u hmotnosti SGB transformátorů.

V tabulkách 4.1 až 4.2 a 5.1 jsou výrobcem uváděné vstupní napětí transformátorů, neboli primární napětí 22kV, po konzultaci s výrobcem mi odepsal, že ceny i specifikace transformátorů pro vstupní napětí 22kV a 6kV jsou stejná.

Celkové ztráty vypočtených transformátorů v kapitole číslo 4. Se, liší od těch, které uvádí výrobce o stovky Wattů. Je to dáno použitím lepších materiálů pro stavbu transformátorů. Snížením ztrát v železe, které jsou dány ztrátovým číslem z_{10} uvádějícím ztrátu ve wattech na 1kg elektrotechnických plechů při standardním kmitočtu 50 Hz.

Ztrátové číslo z_{10} se liší dle jakosti plechů na:

- Teplé plechy
- Studené plechy (orientované)

Ad1. U teplých plechů je ztrátové číslo v rozmezích 1,3 až 1 W/kg.

Ad2. U studených plechů je ztrátové číslo v rozmezích 0,7 až 0,6 W/kg. Jsou to plechy válcovány za studena a vhodně použítí žíhání. Výhodou je jsou větší permeabilita ve směru válcování, i větší magnetická indukce, tím dojde ke snížení hmotnosti magnetického obvodu => snížení ztrát i ztrát celkových.

Při srovnání procentuálního napětí transformátorů ve stavu nakrátko, je pro SGB transformátory se zapojením vinutí Yyn1 pro 250, 400 a 800kVA hodnoty 4,4,6% . Při mém výpočtu byly hodnoty 4,6; 4,68 a 4. Rozdíly jsou způsobené reaktancí a odporem vinutí. Nebo způsobem uložení vinutí, použití jiných izolačních mezer, které mají za následek jiné hodnoty

5.2. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem trojfázových transformátorů s hodnotou vstupního a výstupního napětí 6kV/400V s výkony 250, 400 a 800kVA pro napájení plazmatronu s řízeným usměrňovačem. Na začátku jsou popsány principy, použití a vlastnosti charakteristiky transformátorů. V následující kapitole je popsána definice plazmy a její využití v technologiích jakými jsou například plazmové zobrazovače, magento-plazmové motory nebo zařízení TOKAMAK pro termojadernou syntézu. Dalším bodem této kapitoly je popis plazmových generátorů i plazmatronu GNP320. Pro tento plazmatron navrhuji trojfázové transformátory. Důležitou součástí kapitoly je popis požadavků na transformátor pro usměrňovač a plazmatron. Tyto požadavky mají vliv pro dimenzování, kdyby nebyly brány v úvahu při návrhu, mohlo by dojít při napájení obvodu k přetížení a vybavení jističů v horším případě poškození transformátoru.

Praktická část je zaměřena na podrobný postup výpočtu olejového trojfázového transformátoru o výkonu $S = 250\text{kVA}$, napětí primární strany 6kV a napětí sekundární strany 400V. Spojení vinutí Yy0, frekvence 50 Hz. Po výpočtu tohoto transformátoru následuje tabulka s vypočtenými hodnotami, jak pro 250kVA, tak i 400 a 800kVA. Pro srovnání jsem použil transformátory SGB nabízené na trhu firmami Elpro-energo s.r.o. Cenová nabídka zahrnuje i transformátory BEZ firmy KOČÍ-VALÁŠEK s.r.o.

Ve zhodnocení srovnávám parametry vypočtených hodnot jednotlivých transformátorů s transformátory SGB. V dnešní době je velký sortiment materiálů s různými vlastnostmi, které svými vlastnostmi snižují ztráty a zvyšují účinnost transformátorů.

Použitá literatura:

- [1] Nikola Tesla. Dostupné z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla
- [2] Transformátory malé. Dostupné z WWW:
http://www.sabtrafo.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=72
- [3] Transformátory jednofázové a třífázové. Dostupné z WWW:
<http://elektrika.cz/data/clanky/transformatory>
- [4] Olejové výkonové transformátory. Dostupné z WWW:
<http://www.elpro-energo.cz/vykonove-transformatory/zakladni-popis/olejove-vykonove-transformatory-sgb/>
- [5] Vzduchový transformátor. Dostupné z WWW.
http://www.eurovolt.sk/index.php?page=prod_showsection&secnum=50&secid=525
- [6] Tlumivka. Dostupné z WWW
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Tlumivka>
- [7] Transformátory. [citace]. Dostupné z WWW:
<http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>
- [8] Princip transformátoru obrázk. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Transform%C3%A1tor>
- [9] Zvláštní transformátory. Dostupné z WWW:
http://www.sabtrafo.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=72
- [10] Hapl, J., Nosek, K.,: Stavba Transformátorů, ČVUT, Praha, 1971 [citace].
- [11] Měřička, J., Hamata, V., Voženílek, P., Elektrické stroje, ČVUT, Praha, 1993 [citace].
- [12] J. Vladař, J.Zelenka: Elektrotechnika a silnoproudá elektronika, SNTL/ALFA, Praha 1986 [citace].
- [13] V. Kruml – M. Štefl: Transformátory pro obloukové svařování, Třetí upravené vydání, SNTL, Praha 1985 [citace].
- [14] V. Lysenko: VN zdroje, Zdroje vysokého napětí pro experiment, Pokusy a měřicí přístroje, Ochranné pomůcky, BEN, Praha 2008.
- [15] Havelka, O.: Elektrické přístroje, SNTL, Praha, 1985 [citace].
- [16] Ibl, J., Kubát, M.: Základy průmyslové usměrňovací techniky, SNTL, Praha, 1964 [citace].
- [17] Haškovec, J.Š., Zika, J.: Tyristory, polovodičová technika č.12, SNTL, Praha, 1972 [citace].
- [18] J. Š. Haškovec, F. Lstibůrek, J. Zítka: Tyristory, Druhé přepracované vydání, SNTL, Praha 1972 [citace].
- [19] Hysterezní smyčka [citace]. Dostupné z WWW:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/296-magneticka-hystereze>

- [20] Elpro-energo olejové transformátory [citace]. Dostupné z WWW:
<http://www.elpro-energo.cz/olejove-transformatory/technicka-data/tabulky-6-10kv/>
- [21] Transformátory BEZ. Dostupné z WWW:
<http://www.transformatory.cz/nove-transformatory/detail/8>
- [22] Katalog trafo kočí BEZ[citace]. Dostupné z WWW:
<http://www.transformatory.cz/files/file/souhrnny-katalog-KV.pdf>
- [23] Supravodiče[citace].Dostupné z WWW:
<http://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-a-levitace>
- [24] Simulace rozložení elektrotepelného pole ss oblouku [citace]. Dostupné z WWW:
http://fei1.vsb.cz/kat410/pracoviste/pracoviste_soubory/e213/cz/publikace/2download/aum_znojmo_01.pdf
- [25] Prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. Úvod do teorie plazmatu, AGA, Praha 2011.
- [26] Plazma [citace]. Dostupné z WWW:
http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_20_plt.html
- [27] Startování plazmatronu. [citace]. Dostupné z WWW:
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/06044/index.html>